

Erkundung und Sicherheitsbewertung von Salzformationen im Standortauswahlverfahren

Dissertation

Zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt von
Eva Barbara Krapf, M.Sc.
aus Prien am Chiemsee

genehmigt von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
12. Dezember 2016

Dekanin

Prof. Dr. Inge Wulf

Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr. Hans-Jürgen Gursky

Erstgutachter

Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig

Zweitgutachter

Prof. Dr. Kurt Mengel

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Fachgebiet Endlagersysteme des Instituts für Endlagerforschung der Technischen Universität Clausthal angefertigt.

Allen voran möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig für sein Vertrauen in mich bei der Vergabe dieses Themas, die gute Betreuung meiner Arbeit und die hilfreichen Gespräche bedanken. Weiter gilt mein Dank Prof. Dr. Kurt Mengel für sein Engagement und seine kreativen Ratschläge. Die gemeinsamen Besprechungen haben oft den Anstoß in die richtige Denkrichtung gegeben und neue Ideen hervorgebracht und der Arbeit schließlich den letzten Schliff verliehen. Ohne diese Treffen wäre die vorliegende Arbeit in einem solchen Umfang nicht möglich gewesen.

Mein besonderer Dank gilt außerdem der Firma GeoTec (Clausthal-Zellerfeld) und Dr. Buntebarth für die erfolgreiche Zusammenarbeit und die geduldige Beantwortung meiner zahlreichen Fragen. Die freundschaftlichen Gespräche und Ratschläge werden mich über die Arbeit hinaus begleiten.

Dr. Rainer Müller sowie Dr. Carl-Diedrich Sattler haben einen Großteil der Planung zur Sammlung der Gesteinsproben übernommen. Ich hatte Glück beide mit ihrer Geländeerfahrung und ihrer Ortskunde an meiner Seite zu wissen und will mich an dieser Stelle für die erfolgreichen Exkursionen bedanken.

Eine Dissertation zu schreiben ist eine lange Reise mit zahlreichen Höhen und Tiefen, die man oft nicht alleine bewältigen kann. Viele Leute leisten dazu im Laufe der Zeit ihren Beitrag. Ich danke allen, die mich bei der Erstellung der Arbeit unterstützt, mir zugehört und natürlich auch Korrektur gelesen haben. Mein Dank gilt auch den wunderbaren Kollegen, die mir stets mit Rat und Tat und offenem Ohr zur Seite standen. Ich danke im Besonderen Willy Ciecior und Christina Hemme, die zur gleichen Zeit ihre Dissertation geschrieben haben und die mir oftmals im Verlauf unserer „Doktorandentreffen“ kreative Denkanstöße geben konnten.

Ich widme diese Arbeit all denjenigen Menschen, die immer an meiner Seite sind und auf deren Beistand ich immer zählen kann. Ich denke, ich kann mich glücklich schätzen, dass diese zu zahlreich sind, um sie hier einzeln nennen zu können.

Zusammenfassung

In Deutschland wurde im Jahr 2011 der endgültige Ausstieg aus der zivilen Nutzung der Kernenergie beschlossen. Reststoffe aus dem Betrieb, sowie der Stilllegung und dem Rückbau von kerntechnischen Anlagen bilden in diesem Zusammenhang auch den Großteil des Gesamtaufkommens an radioaktiven Abfällen. Zu deren schadloser Entsorgung und um Mensch und Umwelt dauerhaft zu schützen wird die tiefengeologische Endlagerung mit dem Ziel des langfristigen Einschlusses und der Isolation der Abfälle von der Biosphäre angestrebt. Als Standort für ein tiefengeologisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle war bis zum Erkundungsstopp im Jahr 2012 der Salzstock Gorleben vorgesehen; das Verfahren für die Auswahl eines Standorte für v.a. wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle wurde durch das 2013 erlassene „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle“ (Standortauswahlgesetz – StandAG) neu definiert. Im StandAG werden u. a. Verfahrensschritte und Zuständigkeiten sowie die Rolle der Öffentlichkeitsarbeit für das kommende Verfahren festgelegt. Die neu gegründete Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe sollte dazu Teilaspekte und Grundsatzfragen des Auswahlverfahrens klären und Handlungsempfehlungen geben. Ziel des Verfahrens ist laut STANDAG (2013) die Auswahl desjenigen Standortes, der die bestmögliche Sicherheit im festgelegten Nachweiszeitraum von einer Million Jahren gewährleisten kann. Der Abschlussbericht der Kommission wurde im Juli 2016 veröffentlicht. Die im Bericht der Kommission empfohlenen Kriterien beruhen dabei zu großen Teilen auf einem vorangegangenen 2002 veröffentlichten Bericht des Arbeitskreises Auswahlverfahren für Endlagerstandorte (AkEnd), der im Auftrag des BMU Lösungsvorschläge für die Endlagerproblematik erarbeiten sollte.

Auf Grundlage der Verfahrensschritte nach STANDAG (2013) wird im Rahmen dieser Arbeit ein Vorgehen bei der Erkundung möglicher Standorte empfohlen. Der Prozessweg, wie er im Kommissionsbericht vorgeschlagen ist, wird in einem eigenen Kapitel erläutert. Die Verfahrensschritte aus dem StandAG wie auch aus dem Kommissionsbericht gleichen sich in ihrer Vorgehensweise. In der vorliegenden Arbeit wurden die laut STANDAG (2013) geforderten geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen sowie Abwägungskriterien anhand der für den Nachweiszeitraum relevanten geowissenschaftlichen sowie klimatischen Veränderungen entwickelt. Im Gegensatz zu der Arbeit der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe wurde für die Festlegung der Kriterien kein bestehender Bericht überarbeitet oder angepasst. Es wurden vielmehr alle Sachverhalte von Grund auf neu überlegt und untersucht, welche für ein Endlager, vor allem in Hinblick auf den sicheren Einschluss der Abfälle, entscheidend sind. Die Überlegungen beschränken sich dabei auf Salz in steiler Lagerung (Salzstock).

Den geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, ebenso wie den Abwägungskriterien werden in dieser Arbeit im Gegensatz zum Kommissionsbericht (und AkEnd-Bericht) keine Parameter zugeordnet. Eine sehr frühe Zuordnung von Parametern zu den festgelegten Kriterien könnte in diesem Zusammenhang grundsätzlich geeignete Standorte entsprechend früh aus dem Verfahren scheiden lassen. Gleichzeitig birgt eine späte Festlegung wiederum die Gefahr einer „Anpassung“ von Parametern an die verbliebenen Standorte. Darüber hinaus werden die Abwägungskriterien keiner Gewichtungsgruppe oder Reihenfolge zugeordnet, da nach Meinung der Verfasserin eine Anwendung im Hinblick auf einen daraus resultierenden Sicherheitsgewinn stattfinden sollte.

Die in dieser Arbeit erstellten Empfehlungen zum Inhalt und der Machbarkeit von Sicherheitsuntersuchungen orientieren sich am Bericht der Kommission. Nach jedem Verfahrensschritt wird im StandAG eine vorläufige Sicherheitsuntersuchung gefordert, deren Detailgrad insbesondere von der zum entsprechenden Zeitpunkt bestehenden Datenlage und den gewonnenen Erkenntnissen abhängt. Eine Sicherheitsuntersuchung soll laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) den Nachweis erbringen, dass der Einschluss der radioaktiven Abfallstoffe über den Nachweiszeitraum sicher gestellt ist. Das Endlagersystem wird dazu in seiner Gesamtheit (mit allen sicherheitsrelevanten Bestandteilen) betrachtet und bewertet. Darüber hinaus können so die im Verfahren verbliebenen Standorte oder Standortregionen untereinander verglichen werden.

In der vorliegenden Arbeit werden ebenso Unsicherheiten und Sicherheitsreserven, Erkundungs- und Forschungsbedarf und mögliche Optimierungen im Verfahren identifiziert und benannt. Als zentrales Element wird darüber hinaus ein nicht-invasives Verfahren vorgestellt, welches eine Abschätzung der Temperatur im Einlagerungsniveau für jeden in Frage kommenden Standort noch vor der übertägigen Erkundung ermöglicht.

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren für Endlagerstandorte
AtG	Atomgesetz
BfE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMJV	Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (vor Dez. 2013)
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (ab Dez. 2013)
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
DAEF	Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung
EDZ	Excavation Damaged Zone
EMR	Elektromagnetische Reflexionsmessung
ESK	Entsorgungskommission
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEP	Features, Events, and Processes
FuE	Forschung- und Entwicklung
GFZ	Geoforschungszentrum Potsdam
GOK	Geländeoberkante
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
GW	Grundwasser
KlimaBergV	Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klimabergverordnung)
KW	Kohlenwasserstoffe
LIAG	Leibniz-Institut für angewandte Geophysik
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
StandAG	Standortauswahlgesetz
THMC	Thermisch, Hydraulisch, Mechanisch und Chemisch
TSR	Thermomechanische Sulfatreduktion
URL	Underground Research Laboratory
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Vorgehensweise für die Auswahl eines Standortes für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle	3
2.1	Überblick über das Standortauswahlgesetz (StandAG)	3
2.2	Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle nach BMU (2010)	12
2.3	Begriffsdefinitionen Salzstock und einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG)	15
2.4	Arbeitskreis Auswahlverfahren für Endlagerstandorte (AkEnd)	18
2.4.1	Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien nach AkEnd (2002)	18
2.4.2	Geologische Mindestanforderungen nach AkEND (2002)	22
2.4.3	Abwägungskriterien zur Ermittlung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen nach AkEND (2002)	25
2.5	Abschlussbericht der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“	28
2.5.1	Prozessweg der Standortauswahl	28
2.5.2	Inhalt und Bedeutung von Sicherheitsuntersuchungen	30
2.5.3	Kriterien und ihre Bedeutung im Auswahlverfahren	34
3	Standortauswahlgesetz – §§ 13, 14, 15: Auswahl möglicher Standortregionen und Auswahl für übertägige Erkundung	42
3.1	Identifizierung der sicherheitsrelevanten geowissenschaftlichen Sachverhalte	43
3.1.1	Mögliche Auswirkungen von Kaltzeiten für ein Endlager in norddeutschen Salzformationen	43
3.1.2	Bewertung eines Endlagerstandortes in Salzstöcke und -kissen der off-shore Regionen Deutschlands	58
3.1.3	Rohstoffsituation Norddeutschlands und Gebiete mit besonderer Eignung für die Geothermie oder als Kavernenspeicher	59
3.1.4	Hydrogeologie in Norddeutschland am Beispiel des Salzstocks Gorleben	65
3.1.5	Neotektonik: Seismische Aktivität, vulkanische Aktivität, Krustenspannungen und Störungszonen	73
3.1.6	Nicht glazial bedingte Vertikalbewegungen, Erosion und Subrosion bei gemäßigten Klimaten	81

3.2	Wasserwirtschaftliche und raumplanerische Kriterien, sonstige öffentliche Belange	85
3.3	Bedeutung der geologischen Sachverhalte für einen möglichen Endlagerstandort, Entwicklung von Kriterien	88
3.4	Zur repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung im ersten Verfahrensschritt	95
3.4.1	Erhebungsmöglichkeiten im ersten Verfahrensschritt	107
3.5	Vergleich der Standorte ERAM, Schachtanlage Asse II und Gorleben	110
4	Standortauswahlgesetz – §§ 16, 17: Übertägige Erkundung	113
4.1	Durchführung der übertägigen Erkundungsarbeiten	113
4.2	Geowissenschaftliche Sachverhalte und geeignete Erkundungsergebnisse	116
4.3	Wärmeleitfähigkeitsmessungen an postpermischen Gesteinseinheiten	123
4.3.1	Experimentelle Arbeiten zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten im Deckgebirge	124
4.4	Entwicklungsmöglichkeiten eines Salzstocks	130
4.5	Zur weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchung im zweiten Verfahrensschritt	135
5	Standortauswahlgesetz – § 18: Untertägige Erkundung	145
5.1	Durchführung der untertägigen Erkundung	145
5.2	Geowissenschaftliche Sachverhalte und geeignete Erkundungsergebnisse	148
5.3	Zur umfassenden vorläufige Sicherheitsuntersuchung im dritten Verfahrensschritt	158
6	Standortauswahlgesetz – §§ 19, 20: Abschließender Standortvergleich und Standortentscheidung	168
6.1	Mögliche Vorgehensweise bei der Durchführung des abschließenden Standortvergleichs	168
7	Ausblick	171
	Tabellenverzeichnis	173
	Abbildungsverzeichnis	174
	Literaturverzeichnis	176
	Anhang	186

1 Einleitung und Problemstellung

Die deutsche Bundesregierung hat im Jahr 2011 nach dem Reaktorunglück im japanischen Atomkraftwerk Fukushima erneut den schrittweisen Ausstieg aus der zivilen Nutzung der Kernenergie beschlossen. Das letzte deutsche Atomkraftwerk soll demnach spätestens bis 2022 vom Netz genommen, stillgelegt und anschließend rückgebaut werden. Im Zuge der Stilllegung und des Rückbaus muss jeweils auch die Entsorgung der radioaktiven Abfälle vom Betreiber geregelt werden. Laut § 9a Abs. 1 des Atomgesetzes ATG (2013) müssen Kernbrennstoffe „schadlos verwertet [...] oder als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden (direkte Endlagerung)“. Bis zur Endlagerung ist nach AtG § 9a Abs. 1b der „sichere Verbleib für bestrahlte Kernbrennstoffe sowie [...] zurückzunehmende radioaktive Abfälle in Zwischenlagern“ vorgeschrieben.

Beim Betrieb, wie auch beim Rückbau kerntechnischer Anlagen, entstehen diverse radioaktive Abfälle in unterschiedlicher physikalischer Form, chemischer Zusammensetzung, Aktivität und Langlebigkeit. In Deutschland werden wärmeentwickelnde Abfälle und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung unterschieden. Eine Übertragung in die international gebräuchlichere Einteilung, bezogen auf die Aktivität und Lebensdauer der Abfälle (u. a. schwach, mittel und hoch radioaktive Abfälle, IAEA 2009), ist hierbei nicht eindeutig durchführbar. Grundsätzlich gelten die wärmeentwickelnden Abfälle auch als hoch radioaktiv, die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle entsprechen somit in etwa den schwach- bis mittelfradioaktiven Abfallstoffen. Für den überwiegenden Teil der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle, wie beispielsweise Betriebs- oder Stilllegungsabfälle aus Kernkraftwerken, wird das ehemalige Eisenerzbergwerk Konrad genutzt werden. Der Planfeststellungsbeschluss hierfür erfolgte bereits im Jahr 2002 (BFS 2016b). Im Jahr 2007 begannen schließlich die Umbauarbeiten, die u. a. die Auffahrung neuer Grubenbaue und Einlagerungstrecken umfassen. Der Beginn der Einlagerung ist für das Jahr 2022 geplant.

Für die wärmeentwickelnden und hochaktiven Abfälle, wie bestrahlte Brennelemente und verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, wird zurzeit nach einem geeigneten Endlager gesucht. Der Salzstock Gorleben wurde ab 1979 als potentieller Endlagerstandort zunächst von über Tage, ab 1986 schließlich auch untertägig erkundet (BFS 2016a). Es wurden zwei Schächte sowie ein Erkundungsbereich in 840 m Teufe errichtet. Durch ein intensives Forschungsprogramm sollte die Eignung des Salzstocks bewertet werden. Im Jahr 2000 wurde von der Bundesregierung ein Moratorium für die Erkundung beschlossen, welches schließlich die maximal zulässige Zeitspanne von zehn Jahren andauerte. Während des Moratoriums wurden verschiedene sicherheitsrelevante und konzeptionelle Fragen geklärt, wie beispielsweise die Möglichkeit der Rückholbarkeit, die Gefährdung durch menschliche

Einwirkung, das Vorhandensein chemotoxischer Verbindungen, mögliche Gasbildungsprozesse sowie Betrachtungen zur Einhaltung der Unterkritikalität (siehe dazu BFS 2005). Parallel hierzu wurde der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) im Jahr 1999 damit beauftragt, Vorschläge zur Lösung der Endlagerproblematik und insbesondere zur Standortauswahl zu entwickeln. 2002 wurde der zugehörige Bericht mit der vom AkEnd empfohlenen Vorgehensweise für die Standortauswahl veröffentlicht. Dieser bildet eine wichtige Grundlage für das 2013 erlassene Standortauswahlgesetz (StandAG). Zwischenzeitlich wurden die Erkundungsarbeiten am Standort Gorleben im Oktober 2010 wieder aufgenommen und eine Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG, FISCHER-APPELT ET AL. 2013) durchgeführt. Die Erkundung wurde im November 2012 jedoch wieder gestoppt, um eine neutrale Diskussion für den Erlass des StandAG zu ermöglichen. Mit dem Inkrafttreten des StandAG wurde jegliche Erkundungsarbeit im Salzstock Gorleben endgültig beendet (BFS 2016a). Der Standort Gorleben wird derzeit im Offenhaltungsbetrieb belassen, bis möglicherweise ein Ausschluss oder eine Weitererkundung im Rahmen des Standortauswahlprozesses erfolgt.

Das Standortauswahlgesetz legt nun auf gesetzlicher Grundlage eine Vorgehensweise zur Standortauswahl fest. Eine hierfür neu gegründete „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ sollte sowohl prinzipielle Fragen, wie Entsorgungsoptionen, Kriterien für die Standortauswahl (für alle Wirtsgesteine), die Festlegung von geologischen Mindestanforderungen, Ausschluss- und Abwägungskriterien usw. klären und darüber hinaus das StandAG selbst sowie den dort vorgegebenen Auswahlprozess evaluieren. Die Ergebnisse der Kommission gelten als Handlungsempfehlung für die Überarbeitung des StandAG und damit für die Auswahl des Standortes mit der bestmöglichen Sicherheit. Im Juli 2016 wurde der Abschlussbericht der Kommission veröffentlicht (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016). Das Vorgehen in der Standortauswahl und die anzuwendenden geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien sind im Wesentlichen aus dem AkEnd-Bericht abgeleitet und wurden teilweise verändert und an die unterschiedlichen zu betrachtenden Wirtsgesteine angepasst.

In dieser Arbeit werden nun die geowissenschaftlichen Aspekte und Kriterien neu entwickelt. Darüber hinaus soll im Hinblick auf die Sicherheitsuntersuchung dargelegt werden, welche Aspekte in der Untersuchung als sicherheitsrelevant betrachtet werden müssen und mit welchen Unsicherheiten oder Ungewissheiten umgegangen werden muss. Die Überlegungen werden ausschließlich an Salz als Wirtsgestein in steiler Lagerung, also Salzstöcken, durchgeführt.

2 Vorgehensweise für die Auswahl eines Standortes für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle

2.1 Überblick über das Standortauswahlgesetz (StandAG)

Das „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle“ (kurz: StandAG) wurde am 23. Juli 2013 durch den Bundestag beschlossen und trat durch die Unterschrift des Bundespräsidenten zum Teil am 27. Juli 2013 und in Gänze am 1. Januar 2014 in Kraft. Wie im Gesetz beschrieben, ist das Ziel des Auswahlverfahrens „[...] in einem wissenschaftsbasierten und transparenten Verfahren für die im Inland verursachten, insbesondere hoch radioaktiven Abfälle den Standort für eine Anlage [...] in der Bundesrepublik Deutschland zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für einen Zeitraum von einer Million Jahre gewährleistet.“ (§ 1 Abs. 1 StandAG).

Nach § 6 StandAG ist das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) als Vorhabenträger benannt. Nach Vorgabe in KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) wurde eine Bundesgesellschaft für Endlagerung¹ (BGE) gegründet, die Aufgabenbereiche des BfS, der DBE mbH und der Asse GmbH in sich vereint; die Aufgabe der BGE ist die Standortsuche, der Bau, Betrieb und schließlich die Stilllegung von Endlagern. Somit übernimmt die BGE die Aufgaben des Vorhabenträgers im Auswahlverfahren. Der Vorhabenträger ist nach § 6 Abs. 1 StandAG in der Pflicht, Standortregionen und Standorte auszuwählen und diese nach § 12 Abs. 1 StandAG übertägig und untertägig zu erkunden. Die Bewertung der Erkundungsergebnisse soll regelmäßig stattfinden und in vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zusammengefasst werden.

Der erste Verfahrensschritt² zur Auswahl in Betracht kommender Standorte ist der Ausschluss ungünstiger Gebiete, die den Sicherheitsanforderungen nicht genügen oder die aufgrund von geowissenschaftlichen, wasserwirtschaftlichen oder raumplanerischen Gründen ausgeschlossen werden können oder die die (noch festzulegenden) Mindestanforderungen nicht erfüllen (§ 13 Abs. 1 StandAG). Für die so in Betracht kommenden und vorgeschlagenen Standortregionen werden repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durch den Vorhabenträger erstellt (§ 13 Abs. 2 StandAG). Die Entscheidungsgrundlagen für allgemeine Sicherheitsanforderungen, Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen sowie wirtsgesteins-unabhängige Abwägungskriterien und die Methodik für die durchzuführenden

¹ Im Kommissionsbericht benannt als „Bundesgesellschaft für kerntechnische Entsorgung“

² Die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ teilt das Auswahlverfahren in Etappen und Phasen (Abschlussbericht). Das Vorgehen in dieser Arbeit orientiert sich an der Einteilung des StandAG in Verfahrensschritte.

Sicherheitsuntersuchungen werden laut § 4 Abs. 2 StandAG durch die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ festgelegt. Auf der Basis der Sicherheitsuntersuchungen werden dann Standorte für die übertägige Erkundung vorgeschlagen. Die Ergebnisse und Vorschläge werden an das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit³ (BfE), welches im September 2014 im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit⁴ (BMU) gegründet wurde, übermittelt und überprüft (§ 14 Abs. 1 StandAG). Laut GESETZ ZUR NEUORDNUNG DER ORGANISATIONSSTRUKTUR IM BEREICH DER ENDLAGERUNG (2016) umfassen die Aufgaben des BfE darüber hinaus Verwaltungsaufgaben bei der Planfeststellung, der Genehmigung und Überwachung von Einrichtungen sowohl im Bereich Zwischen- wie auch Endlagerung. Außerdem obliegen dem BfE darüber hinaus Aufgaben bezüglich der Entsorgung radioaktiver Abfälle, der Beförderung und Aufbewahrung und Aufgaben, welche dem Bundesamt per Gesetz zugewiesen wurden.

Die Vorschläge für mögliche Standorte werden durch das BMUB geprüft und durch Bundesgesetz beschlossen (§ 14 Abs. 2 StandAG). Der Vorhabenträger erarbeitet im Vorfeld einerseits Vorschläge für ein geeignetes Erkundungsprogramm und andererseits Prüfkriterien, die anschließend durch das BfE bestätigt werden (§ 15 Abs. 1 und 2 StandAG).

Die §§ 16-20 des StandAG umfassen den schrittweisen Beschluss für einen Standort. Nach jeder der nachfolgend beschriebenen Etappen der Standorterkundung wird eine Sicherheitsuntersuchung durchgeführt. Die Erkundung und die Sicherheitsuntersuchung werden vom Vorhabenträger durchgeführt, bewertet und dem BfE zur Prüfung vorgelegt. Das schrittweise Vorgehen wird im Vorfeld durch das Erkundungsprogramm und die Prüfkriterien festgelegt. Die Vorschläge für weiterführende Erkundungen der Standorte werden dem BMUB unterbreitet. Anschließend werden nach Zustimmung von Bundesrat und Bundestag die Standortauswahl und die nächsten Erkundungsschritte in einem Bundesgesetz beschlossen. Bei jedem Verfahrensschritt sind sowohl die Öffentlichkeit als auch die Behörden beteiligt.

Nach Durchführung der übertägigen Erkundung (§ 16 StandAG) wird nach den festgelegten Anforderungen und Kriterien (§ 4 Abs. 5 StandAG) eine weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchung erstellt. Die durch die Erkundung gewonnen Erkenntnisse werden anhand der standortbezogenen Prüfkriterien, einer Umweltverträglichkeitsprüfung und möglicher Auswirkungen eines Endlagerbergwerkes bewertet. Anschließend werden mögliche

³ Im Kommissionsbericht benannt als „Bundesamt für kerntechnische Entsorgung“

⁴ Die Aufgabenbereiche des BMU sind im Dezember 2013 erweitert worden. Die aktuell gültige Bezeichnung lautet „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit“ (BMUB).

Standorte für die untertägige Erkundung und zugehörige Erkundungsprogramme vorgeschlagen.

Die Standorte für eine weitere untertägige Erkundung werden entsprechend § 17 StandAG festgelegt. Ebenso wird geprüft, „[...] ob das bisherige Standortauswahlverfahren nach den Anforderungen und Kriterien dieses Gesetzes durchgeführt wurde und der Auswahlvorschlag diesen Anforderungen und Kriterien entspricht.“ (§ 17 Abs. 4 StandAG). Die Entscheidung für die Standorte zur untertägigen Erkundung (wiederum per Bundesgesetz; Ausführungen zu Klagemöglichkeiten unter § 17 Abs. 4) soll laut § 17 Abs. 5 StandAG bis Ende des Jahres 2023 getroffen werden.

Im Anschluss an die vertiefte geologische Erkundung wird eine an den festgelegten Anforderungen und Kriterien (§ 4 Abs. 5 StandAG) orientierte umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchung sowohl für die Betriebs- als auch für die Nachverschlussphase erstellt (§ 18 StandAG). Das BfE führt laut § 18 Abs. 4 eine Umweltverträglichkeitsprüfung anhand der durch den Vorhabenträger erstellten Unterlagen durch.

Ein Standortvorschlag wird durch das BfE unterbreitet, der sowohl auf den Sicherheitsuntersuchungen, wie auch auf den Ergebnissen der Öffentlichkeitsbeteiligungen und der Bewertung privater und öffentlicher Belange beruht (§ 19 Abs. 1 StandAG). Unter Berücksichtigung des Standes von Wissenschaft und Technik muss bei dem Standortvorschlag eine „[...] Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers [...]“ (§ 19 Abs. 1 StandAG) gewährleistet sein. Ebenso muss eine Überprüfung erfolgen, ob der ausgewählte Endlagerstandort keinen öffentlich-rechtlichen Vorschriften entgegensteht. Das BfE ist außerdem in der Pflicht, eine umfassende Analyse der möglichen Umweltauswirkungen zu erstellen (§ 19 Abs. 1 StandAG).

Die Standortentscheidung nach § 20 StandAG erfolgt auf der Basis eines durch das BMUB vorzubereitenden Gesetzesentwurfs. Wurden alle Unterlagen, zu denen ein „[...] zusammenfassender Bericht über die Ergebnisse des Standortauswahlverfahrens, die Beratungsergebnisse des gesellschaftlichen Begleitgremiums und die Ergebnisse der Öffentlichkeitsbeteiligung [...]“ (§ 20 Abs. 2 StandAG) gehören, von der Bunderegierung geprüft und bewertet, erfolgt durch Bundesgesetz die Standortentscheidung für das daran anschließende Genehmigungsverfahren. Diese Entscheidung ist verbindlich (§ 20 Abs. 3 StandAG) und soll bis zum Jahr 2031 getroffen sein (§ 1 Abs. 3 StandAG).

Ein vereinfachtes Ablaufschema zur Vorgehensweise während des Standortauswahlprozesses ist in Abb. 1 zu sehen (Stand 2014). Ein Vergleich zwischen den

Verfahrensschritten, wie sie in dieser Arbeit gewählt wurden, mit den jeweiligen korrespondierenden Paragraphen des StandAG und den Verfahrensschritten des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd, Kapitel 1.2) zeigt Tab. 1.

Das Standortauswahlgesetz sah vor, dass zur Vorbereitung des Auswahlverfahrens eine „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (§ 3 Abs. 1 StandAG) gegründet werden sollte. Die Kommission wird laut § 3 Abs. 1 StandAG durch 33 Mitglieder gebildet. Unter der Leitung eines Vorsitzenden sollten acht Vertreter aus der Wissenschaft, jeweils zwei Vertreter aus Umweltverbänden, Religionsgemeinschaften, Wirtschaft und Gewerkschaften, sowie acht Mitglieder des Deutschen Bundestages aus jeder Fraktion und acht Mitglieder aus Landesregierungen die durch das Gesetz vorgeschriebenen Themen diskutieren und in einem abschließenden Bericht veröffentlichen. Nach § 3 Abs. 2 und 5 StandAG sollte dieser bis 31. Dezember 2015 vorgelegt werden.

Die erste Sitzung der Kommission fand am 22. Mai 2014 unter der Leitung von zwei Vorsitzenden statt. Der Zeitpunkt zur Veröffentlichung des Abschlussberichtes wurde während der Arbeitsphase der Kommission bis Juni 2016 verlängert. Im Bericht sollen sowohl Grundsatzfragen diskutiert, als auch Handlungsempfehlungen (z.B. die Entwicklung von Kriterien) gegeben werden. Die Veröffentlichung des abschließenden Berichts wurde im Mai 2016 ein weiteres Mal verschoben. Der Bericht lag im Juli 2016 vor und beinhaltet u. a. diverse Handlungsempfehlungen für das zukünftige Verfahren.

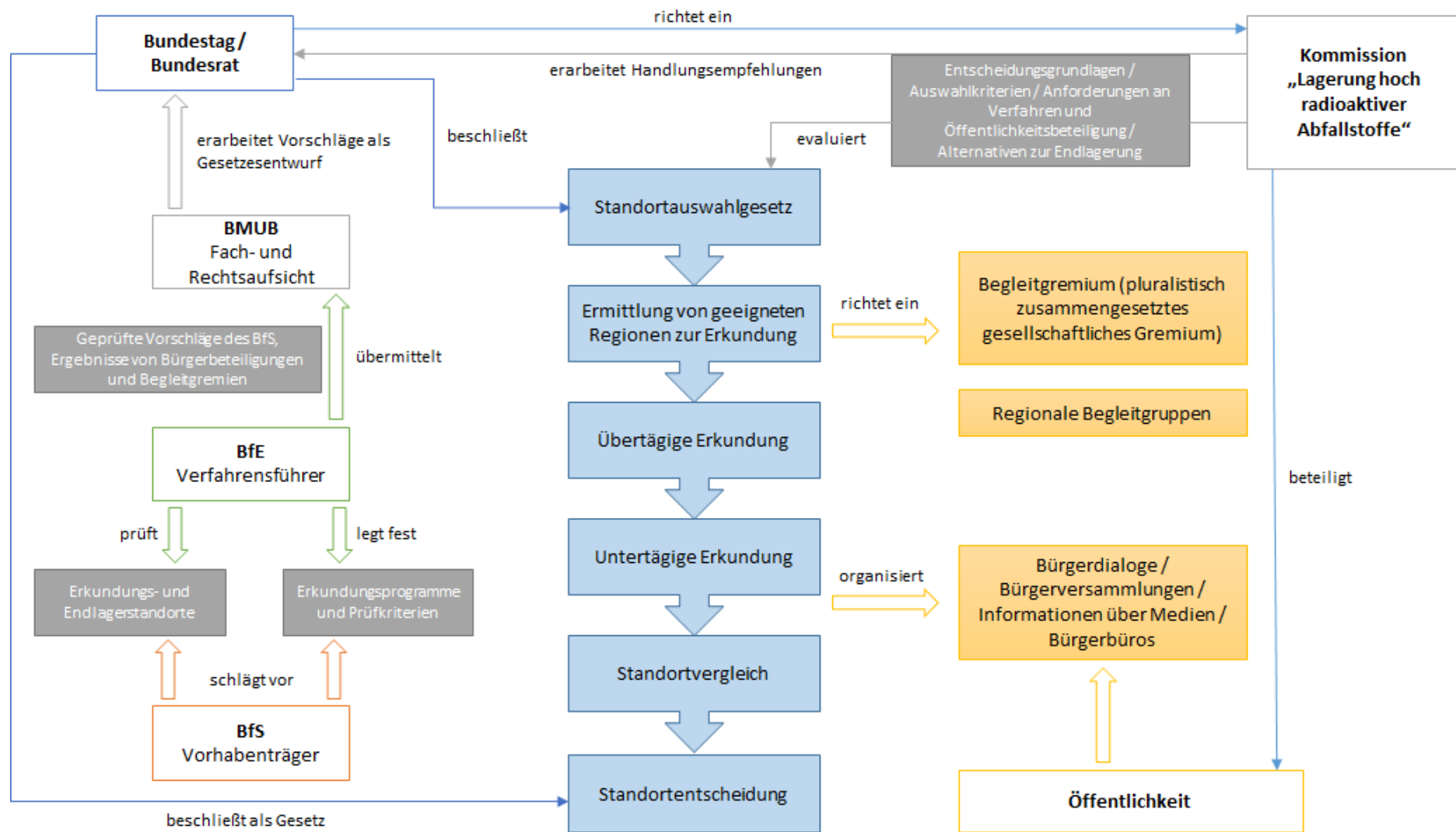


Abb. 1: Ablaufschema des Standortauswahlgesetzes, Stand 2014 (nach BFS 2013)

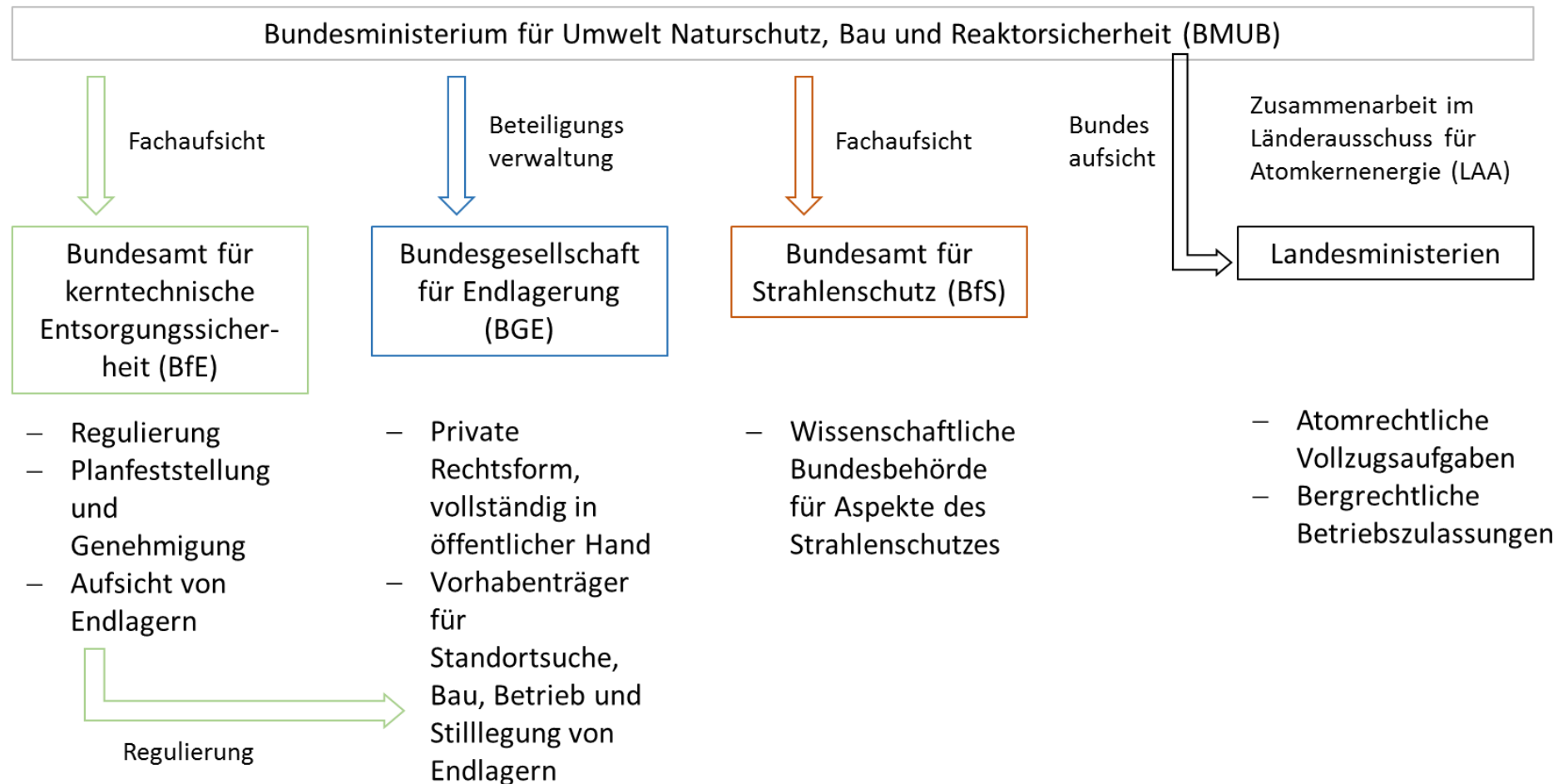


Abb. 2: Neue, im Abschlussbericht vorgeschlagene Organisationsstruktur (verändert nach KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016)

Tab. 1: Vergleich des Standortauswahlverfahrens im Standortauswahlgesetz und der Verfahrensschritte des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Gelb unterlegte Abschnitte stellen den jeweiligen Untersuchungs- bzw. Erkundungsschritt dar. Blau unterlegte Abschnitte beschreiben das Ziel des Erkundungsschrittes in Bezug auf die Standortauswahl und graue Abschnitte das Ziel des Erkundungsschrittes in Bezug auf die Entwicklung von Maßstäben oder Kriterien.

StandAG		AkEnd	
Schritt Untersuchung Ziel bzgl. Standortauswahl Ziel bzgl. Entwicklung von Maßstäben	Anzuwendende Maßstäbe	Schritt Untersuchung Ziel bzgl. Standortauswahl Ziel bzgl. Entwicklung von Maßstäben	Anzuwendende Maßstäbe
§§ 13, 14 In Betracht kommende Standortregionen	Geowissenschaftliche, wasserwirtschaftliche und raumplanerische Ausschlusskriterien, geologische Mindestanforderungen (gem. § 4 Abs. 5 durch Kommission festgelegt), Öffentlichkeitsbeteiligung	1. Verfahrensschritt Gebiete, die bestimmte Mindestanforderungen erfüllen	Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien, geowissenschaftliche Mindestanforderungen
		2. Verfahrensschritt Mindestens fünf räumlich kleinere Teilgebiete mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen	Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

<p>§§ 13, 14</p> <p>Auswahl Standorte für übertägige Erkundung</p>	<p>Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die in Betracht kommenden Standortregionen (gem. § 4 Abs. 5 werden Anforderungen und Kriterien durch Kommission festgelegt), Öffentlichkeitsbeteiligung, Beratungsergebnisse des gesellschaftlichen Begleitgremiums, Äußerung betroffener kommunaler Gebietskörperschaften und betroffener Grundstückseigentümer</p>	<p>3. Verfahrensschritt</p> <p>Nach Möglichkeit fünf, aber mind. drei Standortregionen für die Durchführung übertägiger Untersuchungen</p> <p>Festlegung Erkundungsprogramme übertägig, Festlegung Bewertungsmaßstäbe zur Beurteilung der Untersuchungsbefunde der übertägigen Erkundung mit Beteiligung der Bevölkerung</p>	<p>Planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien, Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien, Beteiligungsbereitschaft, sozioökonomische Potenzialanalysen, Geowissenschaftliche und bergbauliche Aspekte</p>
<p>§ 15</p> <p>Vorschläge für die standortbezogenen Erkundungsprogramme und Prüfkriterien für die übertägige Erkundung der ausgewählten Standorte</p>	<p>Öffentlichkeitsbeteiligung</p>		
<p>§§ 16, 17</p> <p>Übertägige Erkundung</p> <p>Auswahl für untertägige Erkundung</p> <p>Erkundungsprogramme für die untertägige Erkundung</p>	<p>Weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (gem. § 4 Abs. 5 werden Anforderungen und Kriterien durch Kommission festgelegt), standortbezogene Prüfkriterien, Umweltverträglichkeit, sonstige mögliche Auswirkungen von Endlagerbergwerken, Äußerung betroffener Gebietskörperschaften und</p>	<p>4. Verfahrensschritt</p> <p>Übertägige Erkundung</p> <p>Festlegung von mindestens zwei Standorten für die untertägige Erkundung</p> <p>Entwicklung von Prüfkriterien für die untertägige Erkundung mit Beteiligung der Bevölkerung</p>	<p>In Schritt 3 entwickelte Bewertungsmaßstäbe für die übertägige Erkundung, Orientierende Sicherheitsbewertung, Beteiligungsbereitschaft</p>

	Grundstückseigentümer, Klagemöglichkeit, Öffentlichkeitsbeteiligung		
<p>§§ 18, 19, 20</p> <p>Untertägige Erkundungen</p> <p>Standortentscheidung</p> <p>Vertieftes geologisches Erkundungsprogramm und standortbezogene Prüfkriterien</p>	<p>Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für Betriebs- und Nachverschlussphase nach Maßgabe der standortbezogenen Prüfkriterien und der nach § 4 Abs. 5 festgelegten Kriterien und Anforderungen (durch die Kommission), Umweltverträglichkeitsprüfung, Äußerung betroffener kommunaler Gebietskörperschaften und Grundstückseigentümer, Öffentlichkeitsbeteiligung und Beratungsergebnisse des gesellschaftlichen Begleitgremiums, Abwägung sämtlicher privater und öffentlicher Belange, Gewährleistung der Vorsorge gegen Schäden durch Errichtung, Betrieb und Stilllegung, Einhaltung öffentlich-rechtlicher Vorschriften</p>	<p>5. Verfahrensschritt</p> <p>Untertägige Erkundung</p> <p>Entscheidung über den Endlagerstandort</p>	<p>Prüfkriterien und Sicherheitsnachweis</p>

2.2 Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle nach BMU (2010)

In den Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 wird der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstiger schädlicher Wirkungen der Abfälle als Schutzziel genannt. Dies soll durch die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen erreicht werden. Den nachfolgenden Generationen sollen keine unzumutbaren Verpflichtungen durch die radioaktiven Abfallstoffe entstehen. Zu den angestrebten Sicherheitsprinzipien gehört unter anderen die zügige Errichtung eines Endlagers. Während der Errichtung werden weitere Erkenntnisse gewonnen werden, welche zur Anpassung des Endlagerkonzepts und des Sicherheitsmanagements führen können. Für einen langzeitsicheren Einschluss sind ein robustes Barrierensystem, ein vorhersagbares Verhalten des ewG und eine gegen von den zugrunde gelegten Annahmen abweichende Ereignisse unempfindliche Sicherheitsanalyse entscheidend.

Die Sicherheitsanforderungen des BMU (2010) besagen, dass die Integrität des ewG entscheidend für einen angemessenen Schutz vor ionisierender Strahlung ist. So kann gewährleistet werden, dass Abfälle sicher eingeschlossen sind und allenfalls nur geringe Stoffmengen den ewG verlassen können. Die Sicherheitsnachweise sind für alle Betriebszustände des Endlagers und der zugehörigen übertägigen Anlagen zu führen. So kann die Widerstandsfähigkeit der Anlage für längere Zeitabschnitte analysiert und bewertet werden. Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen, Ausfällen oder Abweichungen vom Referenzmodell sind zu berechnen oder abzuschätzen und deren Einfluss auf die Sicherheitsfunktionen zu analysieren.

Für den Langzeitsicherheitsnachweis müssen sowohl eine detaillierte und auf den Standort bezogene Sicherheitsanalyse und eine Sicherheitsbewertung für den Zeitraum von einer Million Jahre erstellt werden. Darin enthalten sind alle Analysen und Argumente, die die Langzeitsicherheit bestätigen können. Nach Meinung der Autorin sollten dort ebenfalls Analysen und Argumente, welche gegen eine Langzeitsicherheit sprechen, erwähnt sein und kritisch betrachtet werden. Für eine Langzeitaussage zur Integrität des ewG muss dieser laut BMU (2010) im Vorfeld exakt räumlich und zeitlich definiert werden. Nur so kann gezeigt werden, dass der ewG die an ihn gestellten Anforderungen erfüllt. Es muss u. a. sichergestellt werden, dass die Bildung sekundärer Wasserwegsamkeiten ausgeschlossen ist und im Deckgebirge vorhandenes Porenwasser keinen Zutritt zur Wirtsgesteinsformation hat. Des Weiteren dürfen die erwarteten Beanspruchungen durch die Auffahrung und Einlagerung die Dilatanzfestigkeiten des ewG nicht überschreiten. Dilatanz ist eine Auflockerung und

Volumenvergrößerung des Gesteins, was wiederum zur Ausbildung von Rissen führen kann. Des Weiteren dürfen ebenso die Fluiddrücke die Belastbarkeit des ewG nicht übersteigen. Auch die Temperaturerhöhung durch die eingelagerten Abfallbehälter darf das Einschussvermögen des ewG nicht negativ beeinflussen, in dem die erhöhte Temperatur zur Rissbildung und Mineralumwandlung führt.

Die numerische Analyse des Langzeitverhaltens wird in Hinblick auf Integrität, Mobilisierung natürlicher Radionuklide und radiologischer Konsequenzen, die Behältereigenschaften, die Eigenschaften des Versatzes und der Verschlussbauwerke erstellt. Dafür werden deterministische Rechnungen durchgeführt, welche wiederum auf einem möglichst realistischen Modell beruhen sollen. So kann das zu erwartende Systemverhalten prognostiziert und Belastungen für die Komponenten abgeschätzt werden, um eine Optimierung des gesamten Endlagersystems zu erreichen. Darüber hinaus sollen Unsicherheits- sowie Sensitivitätsanalysen ausgeführt werden. So kann die Spannweite der Ergebnisse erfasst und mögliche Modellunsicherheiten erkannt werden.

Im Hinblick auf Sicherheit bei der Endlagerauslegung soll der ewG in einer ausreichenden Tiefe und mit ausreichendem Abstand zu geologischen Störungen errichtet werden. Der Durchörterungsgrad soll möglichst gering gehalten werden, ebenso die Anzahl offener Einlagerungsbereiche. Diese sollen nach der Behältereinlagerung verfüllt und sicher gegen das Grubengebäude verschlossen werden. Die Handhabung der Abfallbehälter soll möglichst komplett getrennt von allen bergmännischen Arbeiten stattfinden. Die Gebinde müssen derart gestalten sein, dass sie während der gesamten Betriebsphase rückholbar sind. Nach Verschluss des Endlagerbergwerks müssen die Abfallbehälter im Falle einer Bergung noch für 500 Jahre handhabbar sein. Gleichzeitig dürfen die dafür notwendigen Maßnahmen die Langzeitsicherheit nicht negativ beeinträchtigen. Diese soll wiederum durch ein Mehrbarrierensystem gesichert werden, das die zeitliche Wirksamkeit der einzelnen Barrieren berücksichtigt und aufeinander abstimmt.

Der Betreiber muss für ein Sicherheitsmanagement sorgen, welches während der Auffahrung und des Betriebes bis zur Stilllegung in Kraft bleibt. Damit sollen alle Anforderungen an die Sicherheit, wie beispielsweise die Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte, überprüft und gewährleistet werden. Die Organisationsstruktur muss laut BMU 2010 am Sicherheitsmanagement orientiert sein und soll deshalb beispielsweise Transparenz bieten, kontinuierlich überprüft und verbessert werden können und klare Verantwortlichkeiten ausweisen. Nach der Stilllegung der Anlage sollen nach BMU (2010) Kontrollen durchgeführt werden. Die Maßnahmen dazu werden vor dem Verschluss festgelegt und sollen möglichst

lange Bestand haben. Darüber hinaus sollen alle entscheidenden Dokumente, wie z.B. Daten über Abfallmenge und –art, Sicherheitsnachweise, Informationen zur Durchführung der Auffahrung, des Betriebs und der Stilllegung erstellt werden und auch nach dem Verschluss verfügbar bleiben.

Auch der Themenbereich der Sicherheitsuntersuchungen unterliegt aktuellen Forschungsarbeiten. Der aktuelle Stand der kann u. a. in IAEA 2012, ICRP 2013, NEA 2012b, NEA 2013a, NEA 2014 nachgelesen werden. Laut einer DAEF-Stellungnahme (DAEF Stand 2015, in Vorbereitung) wird unter anderem empfohlen, dass eine stetige Optimierung während des Verfahrens in Hinblick auf die Sicherheit durchgeführt werden soll. Außerdem soll die Sicherheitsuntersuchung Entscheidungen während des Auswahlverfahrens unterstützen. Dies deckt sich auch mit den Vorschlägen der Kommission. In IAEA (2012) wird vorgeschlagen, dass auf Basis von bestehenden Regelwerken in Hinblick auf das zu erwartende Abfallinventar sowie den Entwicklungsstand des Endlagerprogramms eine Sicherheitsstrategie entwickelt werden soll. In der Gesamtheit bildet dies die Basis für die darauf zu erarbeitende Systembeschreibung, welche das Endlagersystem mit allen enthaltenen Sicherheitsfunktionen (technische, geotechnische Barrieren) umfasst; daraus kann eine Sicherheitsbewertung abgeleitet werden. Für den Zeitraum nach Verschluss des Endlagers umfasst dies auch Modellrechnungen und Szenarienentwicklung (IAEA 2012). Die Sicherheitsbewertung wird als zentrales Element zur Erstellung eines Safety Case (wiederum Grundlage für ein angestrebtes Genehmigungsverfahren) gesehen. Die Belastbarkeit der Daten bzw. der Informationsstand hängen natürlich vom Fortschritt des Verfahrens ab. In NEA (2013a) wird empfohlen, dass zuerst Abfallarten und –mengen bestimmt werden; darauf folgt die Auswahl des Wirtsgesteins und eines passenden Konzepts sowie der Identifizierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs, was schließlich zu einer Auswahl von Standorten führen soll.

Abschlussbericht Kommission: Empfehlung bezüglich der Sicherheitsanforderungen nach BMU 2010

Laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) beziehen sich die Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) auf einen bereits ausgewählten Standort, nicht jedoch auf das Standortauswahlverfahren an sich. Trotzdem sind die Anforderungen grundlegend für die Erstellung der Sicherheitsuntersuchungen, welche in jeder Phase des Auswahlverfahrens gefordert werden. Im Abschlussbericht (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016) wird weiter erklärt, dass die Sicherheitsanforderungen (BMU 2010)

grundsätzlich dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Darüber hinaus ist der gewählte Nachweiszeitraum (eine Million Jahre) sowie Anforderungen an den Strahlenschutz im Betrieb und Nachbetrieb im internationalen Vergleich als hoch (streng) zu bewerten. Trotzdem werden im Abschlussbericht (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016) Überarbeitungsvorschläge beschrieben. So sollen beispielsweise die Sicherheitsanforderungen auf das Wirtsgestein Kristallin ausgeweitet werden, Weisungen zur Einhaltung von Grenztemperaturen überarbeitet sowie Fragen zur Bergbarkeit überprüft werden. Darüber hinaus sollen zeitnah Leitlinien die bestehenden Sicherheitsanforderungen ergänzen. Diese sollen das Sicherheitsmanagement sowie eine Vorgehensweise und Optimierung einer Fehlerkorrektur definieren. Darüber hinaus sollen Modellierungsmethoden in Bezug auf Freisetzungsrechnungen, dynamische Prozesse, Vorgänge in der Biosphäre sowie Ausbreitungsrechnungen dargelegt werden, ebenso wie eine geeignete Maßnahme zur Bestimmung des ewG und zugehöriger Barrieren (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016).

2.3 Begriffsdefinitionen Salzstock und einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG)

Salzstock

Ein Salzstock kann als Salzstruktur definiert werden, die aufgrund der geringeren Dichte von Salzgestein an Schwächezonen im überlagernden Deckgebirge aufsteigt. Dieses Aufsteigen des Salzes wird auch Diapirismus genannt. Als Voraussetzung werden von BAHLBURG & BREITKREUZ (2004) eine ausreichende Plastizität des aufsteigenden Materials und ein ausreichender Dichtekontrast zwischen plastischem Material und dem überlagernden Gestein genannt. Die Salzstruktur wird durch den Gebirgsdruck verformt und intern deformiert. Diapirische Salzsteinstrukturen sind meist kegel- oder pilzförmig und haben durch ihren Aufstieg die überlagernden Gesteinsstrukturen verstellt und zum Teil aufgeschleppt. Es ist darüber hinaus möglich, dass Salzdiapire bis an die Erdoberfläche aufsteigen. Während des Aufstiegs kann es passieren, dass der Diapir von seiner Basis abreißt, wenn nicht genügend Salz an in der Wurzelzone vorhanden ist.

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Laut AkEND (2002) ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) Teil der geologischen Barrieren, der zusammen mit den geotechnischen sowie technischen Barrieren den Einschluss im Nachweiszeitraum gewährleisten soll. Der ewG stellt einen definierten Bereich um das Endlagerbergwerk dar und soll die radioaktiven Abfälle und deren Inhaltsstoffe für den Zeitraum von einer Million Jahre sicher umschließen. Im AkEnd-Bericht besteht der ewG im Allgemeinen aus Gestein mit hoher Barrierenwirksamkeit. Das Wirtsgestein wiederum soll vor allem den Auswirkungen durch den eingebrachten Abfall, wie Wärmeeintrag und Gasentwicklung, Widerstand bieten. Durch diese Definition des AkEnd wird eine funktionale Unterscheidung zwischen ewG und Wirtsgestein getroffen, die sich auch darin ausdrückt, dass der AkEnd verschiedenen mögliche Konstellationen für ewG und Wirtsgestein („Konfigurationstypen“) angibt.

In dieser Arbeit soll ausschließlich Salz in steiler Lagerung betrachtet werden. Der ewG sowie geotechnische Barrieren sind im Wirtsgestein Salz lokalisiert. Lediglich Schächte bzw. Rampen führen aus dem Salzstock heraus und bis an die GOK. Das heißt auch, dass ewG und Wirtsgestein aus dem gleichen Material bestehen (entspricht Typ A der Konfigurationstypen zwischen Wirtsgestein und ewG, definiert durch AkEnd 2002). Für beide Bereiche sind die geologischen Mindestanforderungen, das Einschlussvermögen zu gewährleisten und die dafür nötigen Anforderungen einzuhalten, sowie die Integrität und die Prognostizierbarkeit für eine Million Jahre nachzuweisen. Ein Schema für den Zusammenhang der verschiedenen Bereiche bei der Planung eines Endlagerbergwerkes ist in Abb. 3 zu sehen.

Nach BMU (2010) wird der ewG als Teil des Endlagersystems definiert, der den Einschluss der Abfälle zusammen mit den technischen Verschlüssen, wie Abschlussbauwerke, Schachtverschlüsse etc. gewährleistet.

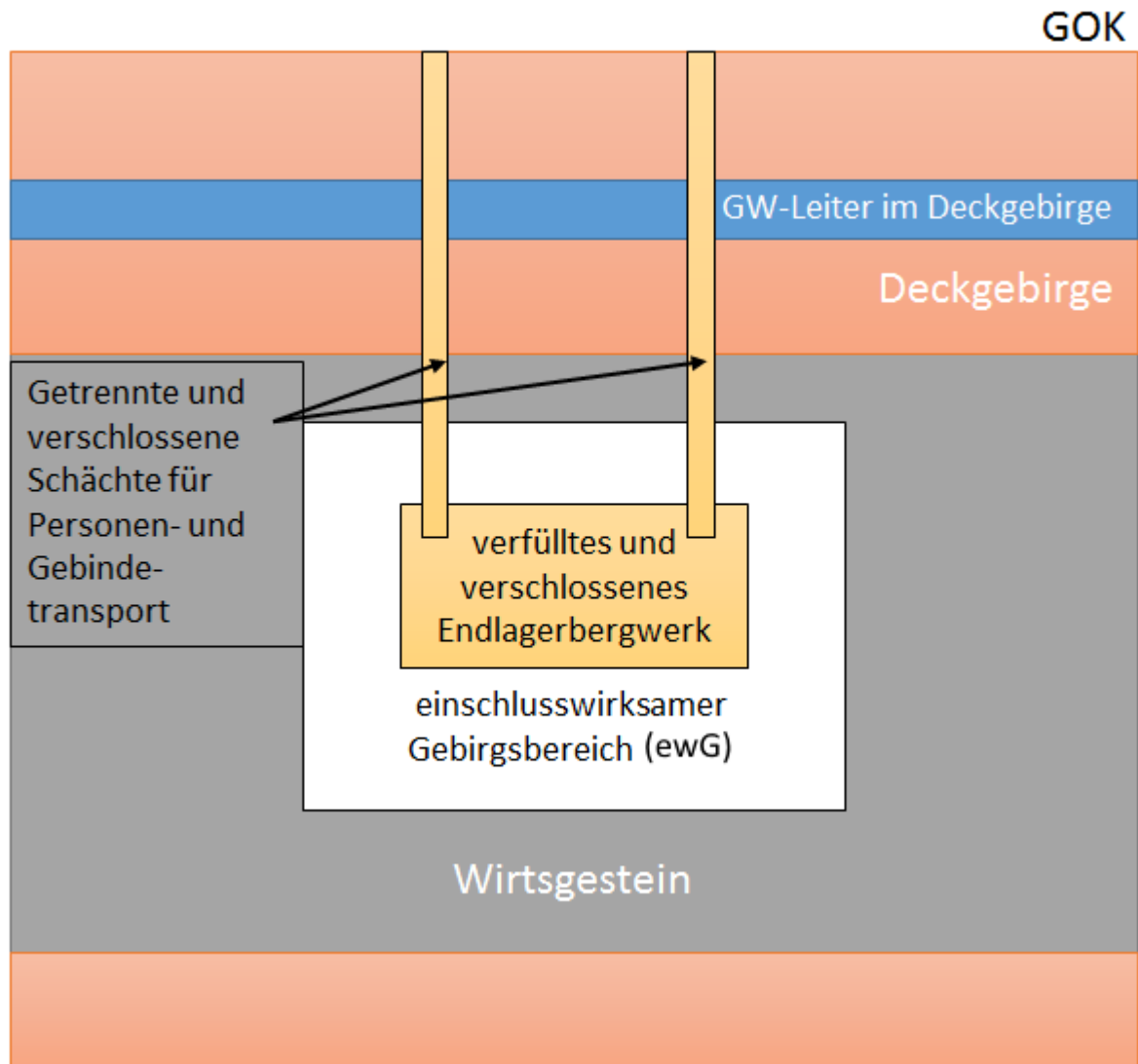


Abb. 3: Vereinfachtes Schema des geologischen Mehrbarrierensystems (Variante mit Zugang über Schächte)

2.4 Arbeitskreis Auswahlverfahren für Endlagerstandorte (AkEnd)

Der AkEnd (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte) wurde im Februar 1999 durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) ins Leben gerufen. Der Arbeitskreis umfasste bis zur Veröffentlichung des Berichts 2002 14 Mitglieder aus unterschiedlichen Bereichen. Dazu gehörten Fachleute aus den Geowissenschaften, Sozialwissenschaften, Chemie, Physik, Mathematik, Bergbau, Deponietechnik, Ingenieurwesen und Sozialwissenschaften. Damit waren sowohl ein breites Wissensspektrum als auch unterschiedliche Erfahrungen und Meinungen der Mitglieder zum Thema Endlagerung (AKEND 2002) vorhanden. Der Arbeitskreis arbeitete „unabhängig und frei von Vorgaben und Weisungen“ (AKEND 2002).

Ziel des AkEnd war die Erarbeitung von Vorschlägen für „neue wissenschaftliche und gesellschaftliche Wege zur Lösung des Endlagerproblems“ (AKEND 2002). Das Ergebnis ist ein umfassender Bericht, der sich mit Grundfragen für die Auswahl eines Endlagerstandortes beschäftigt und dazu Lösungsvorschläge bringt. Diese Lösungsansätze betreffen Kriterien und Vorschläge zur Vorgehensweise für die Standortauswahl und schafften somit auch eine Grundlage für das Standortauswahlverfahren, wie es heute im Standortauswahlgesetz beschrieben ist. Hierbei soll besonders auf den Gedanken aufmerksam gemacht werden, dass die nachfolgend definierten geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien während der gesamten Standortauswahl bestehen bleiben und zu jedem Zeitpunkt angewandt werden können. Das heißt, dass eventuell nicht alle Informationen, die z.B. zu einem Ausschluss führen könnten, bereits vor einer über- oder untertägigen Erkundung vorliegen. Sollte später im Verfahren ein Ausschlusskriterium bestätigt werden (oder eine Mindestanforderung fehlen), so kann bzw. muss der Standort ausgeschlossen werden.

2.4.1 Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien nach AkEnd (2002)

Der AkEnd macht in seinem Bericht Vorschläge zu geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen. Davon ausgehend sollen auf der Basis von in Gewichtungsgruppen eingeordneten Abwägungskriterien besonders günstige Teilgebiete festgelegt werden. Der AkEnd legt geowissenschaftliche Ausschlusskriterien fest, deren Nichterfüllen zum Ausschluss eines Gebietes als mögliche Standortregion führt. Diese sind im Folgenden noch einmal zusammengefasst und stammen in ihrer Gesamtheit aus dem 2002 veröffentlichten Bericht des AkEnd:

Großräumige Vertikalbewegung

Im Bereich des Endlagers darf es keine großräumige Hebung von mehr als einem Millimeter im Mittel pro Jahr im prognostizierbaren Zeitraum geben. Laut AkEnd muss zwischen natürlichen und von Menschen verursachten Vertikalbewegungen, z.B. durch Grundwasserabsenkung oder untertägige Flutungen im Rahmen von bergbaulichen Vorgängen, unterschieden werden. Vordergründig für die Planung eines Endlagers sind hierbei allerdings nur die großräumigen natürlichen und somit nicht anthropogen beeinflussbaren Hebungen.

Geht man von einer vertikalen, konstanten Bewegung bei gleichzeitiger Erosion von 1 mm/Jahr aus, würde diese nach einer Million Jahre einen Gebirgsbereich von 1000 m freigelegt haben. Ein Endlager, das in einigen 100 m Tiefe errichtet wurde, könnte so theoretisch bis zur Oberfläche gelangen.

Eine genaue Abgrenzung eines solchen Gebietes mit verstärkter Hebungsrate ist laut AkEnd in manchen Fällen nicht eindeutig durchzuführen, v. a. bei anthropogen verursachter Hebung in Folge von Bergbautätigkeiten. Generell sind Vertikalbewegungen gekoppelt mit anderen geodynamischen Prozessen und sollten deshalb zusammen mit dem Vorkommen von Erdbeben oder Störungszonen betrachtet werden. Lokale Senkungsgebiete, z.B. aufgrund von Subrosion, wie auch die Randbereiche von Regionen mit verstärkter vertikaler Bewegung müssen als Einzelfälle betrachtet werden.

Aktive Störungszonen

Nach AkEnd können Verwerfungen mit deutlichem Versatz durch Kartierung im Gelände oder mit Hilfe von seismischen Messungen gut dokumentiert werden, im Gegensatz zu Zerrüttungszonen. Hier sind spezielle Methoden zur Detektion nötig, z.B. die Geoelektrik, mit deren Hilfe man die Verteilung von mineralisiertem Wasser im Untergrund und in einer möglichen Zerrüttungszone sichtbar machen kann. Die gesammelten Ergebnisse lassen meist eine Rekonstruktion der Bewegungsereignisse zu.

Als neotektonische Störungen bezeichnet man nach Definition des AkEnd solche Störungen, welche sich in einem Zeitabschnitt ereignet haben, der an der Basis des Neogens (Miozän bis Pliozän) bzw. an der Basis des Rupel (Unteroligozän) beginnt und bis in die Gegenwart reicht. Die Basis des Rupel wird durch eine marine Referenzfläche definiert, die ein absolutes Alter von 34 Mio. Jahren hat (AkEnd 2002). Laut AkEnd sind Verwerfungen als neotektonisch

„aktive“ Störungen und wichtig für die Sicherheit eines Endlagers einzuschätzen, die nachweislich oder sehr wahrscheinlich im Zeitraum seit 34 Mio. Jahren (Rupel) bis heute stattgefunden haben, die mit seismischen Ereignissen in Verbindung stehen und an denen der Transport von Fluiden nachgewiesen werden kann.

Die räumliche Ausdehnung solcher Störungszonen ist nicht eindeutig identifizierbar. Deshalb sollte nach Einschätzung des AkEnd in solchen Regionen mit besonders ungünstigen Verhältnissen ein „Sicherheitsaufschlag“ von mehreren Kilometern zu beiden Seiten der Störung kalkuliert werden.

Seismische Aktivität

Die Einschätzung des AkEnd bezüglich seismischer Aktivität bzw. von möglichen Schäden im Endlager durch Erdbeben­tätigkeit beruht auf der „Karte der Erdbebenzonen Deutschlands“ der DIN 4149. Hier werden Regionen dargestellt, in denen in einem Zeitraum von ca. 500 Jahren Erdbeben­tätigkeiten in bestimmten Intensitäten zu erwarten sind. Die Einschätzung bezieht sich auf Auswirkungen und Schäden an Bauwerken an der Oberfläche.

Nach Einschätzung des AkEnd müssen Gebiete größer als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 ausgeschlossen werden. Deren Randbereiche sollten einzeln auf deren Eignung überprüft werden. Erdbebenzone 1 entspricht einer maximal beobachteten Erdbebenintensität ab 7.0 der EMS (Europäische Makroseismische Skala) an der Erdoberfläche, was merklichen Schäden an übertägigen Bauwerken entspricht. Bei Beben mit geringeren Intensitäten entstehen geringere oder keinerlei Schäden (ÖTES 2005). Der AkEnd merkt hierbei an, dass die seismische Aktivität eines Gebietes mit dem Vorhandensein aktiver Störungen gekoppelt ist und somit auch für eine längerfristige Prognose beide Ereignisse betrachtet werden müssen.

Vulkanische Aktivität

Die Einschätzung des AkEnd bezüglich der vulkanischen Gefährdung beruht auf einer Experten­umfrage zu einigen Grundfragen. Geklärt werden sollte in diesem Zusammenhang, ob eine Aussage zum Vulkanismus in der Eifel und dem Vogtland bzw. dem Egergraben getroffen werden kann und ob sich die Betrachtungen auch auf Regionen darüber hinaus ausweiten müssen. Ebenso sollte abgeschätzt werden, wie wahrscheinlich ein vulkanisches

Ereignis im veranschlagten Zeitraum von einer Million Jahren tatsächlich ist. Ein weiterer entscheidender Aspekt sind die Auswirkungen eines solchen Ereignisses und deren Reichweite. Der Vergleich mit dem Vorgehen in anderen Ländern wird laut der Expertenbefragung als hilfreich angesehen.

Darin stimmte man ebenfalls überein, dass nur die Eifel und das Vogtland/der Egergraben als Regionen mit möglicher vulkanische Gefährdung zu benennen sind. Hierbei ist ein vulkanisches Ereignis in der Eifel innerhalb einer Million Jahre als sicher anzunehmen. Im Bereich des westlichen Teils des Egergrabens ist das Aufleben des Vulkanismus mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % einzuschätzen.

Eine Prognose möglicher Auswirkungen bezieht sich auf Schäden an der Oberfläche, wie Waldbrände, Hebungen, Eruptionen, Bildung von Maaren, Ablagerung pyroklastischer Massen und ähnliche Ereignisse. Ein Magmenzutritt untertage in ein Endlager ist unwahrscheinlich. Trotzdem sollten mögliche Auswirkungen in Bezug auf die Stabilität des Endlagers und einen möglicherweise folgenden Grundwasserzutritt ebenso wie Temperaturspannungen, vulkanische Beben und induzierte Bewegungen an Störungen betrachtet werden. Allerdings zeigen Modelle laut AkEnd (2002), dass Auswirkungen durch Temperaturspannungen nur in unmittelbarer Nähe des Vulkanschlotes bis in ca. 1 km Entfernung auftreten, welche wiederum nach einigen tausend Jahren zur Bildung von Rissen führen können.

Nach der Einschätzung des AkEnd sollten zukünftige vulkanische Ereignisse bei der Auswahl eines Standortes berücksichtigt und beim Ausschluss von Gebieten mit vulkanischer Aktivität zusätzlich ein Sicherheitssaum von 10 km um potentiell gefährdete Regionen beachtet werden.

Grundwasseralter

Laut AkEnd weist ein hohes Grundwasseralter auf eine langfristig langsame Grundwasserbewegung und somit stabile hydrochemische Grundwasserverhältnisse hin. Diese Annahme kann allerdings ausschließlich mit Hilfe von detaillierten Information belegt werden, die allenfalls nur an einzelnen Standorten vorhanden sind. Allerdings kann aus den Konzentrationen bzw. Konzentrationsverhältnissen bestimmter Umweltisotope auf günstige oder ungünstige geologische Verhältnisse in Bezug auf Grundwasseralter geschlossen werden. Dazu gehören Tritium (^3H), Deuterium (D), ^{14}C und ^{18}O .

Die „global meteoric water line“ bezeichnet ein bestimmtes Verhältnis von δD zu $\delta(^{18}O)^2$, welches die Isotopenzusammensetzung von heutigen Niederschlägen charakterisiert. Abweichende Verhältnisse von δD zu $\delta(^{18}O_2)^2$ geben einen Hinweis auf Grundwasser, welches unter abweichenden klimatischen Bedingungen gebildet wurde, auf Beeinflussung der Isotopenzusammensetzung durch Austauschvorgänge im Grundwasserleiter oder andere Bedingungen, wie z.B. der Einfluss von marinem Wasser zum Zeitpunkt der Grundwasserbildung.

Das Vorkommen von Tritium und ^{14}C deutet wiederum im Hinblick auf den gewünschten Isolationszeitraum von einer Million Jahren auf junges Grundwasser hin. Deshalb schlägt der AkEnd in seinem Bericht vor, dass Regionen, in denen das Grundwasser im Endlagerbereich und dessen Umgebung Tritium und/oder ^{14}C enthält („junges“ Grundwasser), aus dem Auswahlverfahren ausgeschlossen werden. Allerdings sollte beachtet werden, dass die Erfüllung dieses Kriterium allein kein Beweis für ein ausreichend hohes Grundwasseralter und damit für eine geeignete geologische Situation ist.

2.4.2 Geologische Mindestanforderungen nach AkEND (2002)

Im Sinne eines zukünftig auszuweisenden einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) müssen die geologischen Mindestanforderungen an dem in Frage kommenden Standort erfüllt sein. Der AkEND (2002) stellt bei der Auswahl eines Standortes Mindestanforderungen an einen möglichen Gesteinskörper, deren Nichterfüllung zum Ausschluss führt. Eine Überprüfung der Einhaltung der Mindestanforderungen erfolgt in jedem Verfahrensschritt. Die folgenden Anforderungen stammen in ihren Grundzügen, soweit nicht anders beschrieben, aus dem AkEnd-Bericht (2002):

Kein oder langsamer Transport von ungesättigten wässrigen Lösungen des Deckgebirges im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Das Gestein, in welchem der einschlusswirksame Gebirgsbereich liegen soll, muss eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner 10^{-10} m/s aufweisen. Bei Gesteinen mit höherer Durchlässigkeit ist die geforderte geringe Grundwasserbewegung nicht zu erwarten.

Nach dem Bericht des AkEND (2002) liegt die Gebirgsdurchlässigkeit für Steinsalz in einer Bandbreite von 10^{-17} - 10^{-10} m/s in einer mittleren Testtiefe von 300-841 m unter Geländeoberkante (GOK) mit einem Medianwert von 10^{-14} m/s.

Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die vertikale Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs soll mindestens 100 m betragen, um einen großen Abstand zu wasserführenden umgebenden Formationen und Sicherheit im Falle eines Versagens einzelner Barrieren zu gewährleisten. Der AkEND (2002) definiert hier allerdings eine Mächtigkeit des ewG, die größer als 150 m ist als günstig. Eine Mächtigkeit von 100-150 m wird als bedingt günstig eingeschätzt.

Die flächenmäßige Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss ausreichend für die Errichtung eines Endlagers sein. Unter Berücksichtigung der Wärmeentwicklung der einzulagernden Abfälle und der benötigten Infrastruktur bedeutet dies nach Einschätzung des AkEnd ca. 3 km² in Salz und 10 km² in Ton oder Granit. Der AkEND (2002) betrachtet hierbei eine mehr als zweifache Ausdehnung der zu Grunde liegenden 3 km² im Salzgestein als „günstig“. Beträgt die Ausdehnung des geplanten ewG weniger als das Zweifache, wird diese Situation als „weniger günstig“ eingestuft. Der AkEND (2002) bezieht sich bei der Definition der Mindestanforderungen ausschließlich auf die Streckenlagerung. Für ein zukünftiges Endlagerbergwerk sollte allerdings auch die Möglichkeit der Bohrlochlagerung in Betracht gezogen werden. Ein Teil der Mindestanforderungen ist dabei für beide Einlagerungstechniken gleichermaßen gültig. Allerdings muss laut AkEND (2002) beim Konzept der Streckenlagerung eine vertikale Ausdehnung von mindesten 100 m möglich sein.

Um das Endlager ausreichend vor naturbedingten Ereignissen an der Erdoberfläche zu schützen, soll die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in mindestens 300 m Teufe liegen, wobei der AkEND (2002) eine Teufe der oberen Begrenzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in 300-500 m als bedingt günstig und in mehr als 500 m als günstig bewertet. Der Betrieb eines Bergwerks in größeren Teufen wäre wegen der hohen Gebirgstemperatur nur mit zusätzlichem technischem Aufwand durchführbar (AkEND 2002); deshalb soll das Grubentiefste des Endlagerbergwerks nicht tiefer als 1500 m liegen, was aber als Tiefe mit besonderen Schwierigkeiten erscheint. Die Tiefe von 1500 m geht mit einer hohen Temperatur im Bereich von ungefähr 60 °C einher.

Hierzu soll angemerkt werden, dass die Fließfähigkeit von Salzgestein unter diesen Bedingungen erhöht ist, was sowohl die Auffahrung wie auch die Offenhaltung während der Einlagerungsphase erschweren könnte.

Gefahr durch Gebirgsschlag

Laut AKEND (2002) darf es in den aufgefahrenen bzw. wieder versetzten Strecken im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. im Wirtsgestein keine Gefahr durch Gebirgsschlag geben. Nur so sind die Errichtung und der Betrieb des Endlagers mit der notwendigen Sicherheit zu gewährleisten.

Nach LUX (2014) bezieht sich der Begriff Gebirgsschlag in diesem Verfahrensschritt nicht auf das Grubengebäude als solches, sondern bezeichnet eine charakteristische Eigenschaft bestimmter Gesteine. Von manchen Gesteinsarten ist bekannt, dass ein aufgefahrener Hohlraum ohne zusätzliche Ausbauten nicht offen gehalten werden kann. Es kann zu Einbrüchen oder Abschalungen kommen. Somit sollen Gesteinsarten, bei denen eine fehlende Stabilität im Vorfeld bekannt ist, vermieden werden. Ein Beispiel hierfür im Salzgestein ist der Carnallit.

Auch die Entsorgungskommission empfiehlt, dass geologische Situationen vermieden werden müssen, bei denen es großräumig und grundsätzlich ohne warnende Anzeichen im Vorfeld zu Verbrüchen kommen kann (ESK 2015).

Gewährleistung der Sicherheit für den Zeitraum von einer Million Jahre

Es darf keine Erkenntnisse oder Daten geben, welche die Eignung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in Bezug auf geowissenschaftliche Mindestanforderungen, wie Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung, für einen Zeitraum von einer Million Jahre in Frage stellen. Nur so kann die Beständigkeit der Sicherheitsaussagen bezogen auf geowissenschaftliche Sachverhalte und Wirksamkeit der geologischen Barrieren gewährleistet werden.

2.4.3 Abwägungskriterien zur Ermittlung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen nach AkEND (2002)

Nach AkEnd sollte der Fokus zur Ermittlung eines geeigneten Endlagerstandortes nicht allein auf dem Wirtsgestein oder dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich liegen. Deshalb definiert der AkEnd einen weiteren Verfahrensschritt, in dem Anforderungen gestellt werden, deren Erfüllung auf eine besonders günstige geologische Situation hinweisen.

Der Abwägungsprozess erfolgt mit Hilfe von Abwägungskriterien, die definieren, inwiefern die Bedingungen bzw. die zugehörige Kriterien an eine günstige geologische Situation erfüllt werden. Die dabei zentralen Anforderungen und Kriterien werden nach deren Bedeutung für die Langzeitsicherheit gewichtet und die Ergebnisse der gewichteten Einzelaussagen zu einer Gesamtaussage zusammengefasst (Aggregation). So können Teilgebiete ermittelt werden, die als besonders günstig anzusehen und vom Standpunkt der Sicherheit aus, als gleichwertig einzuschätzen sind.

Eine besonders günstige geologische Gesamtsituation hat ein Teilgebiet dann, wenn eine höhere Zuverlässigkeit in Bezug auf das geschätzte Isolationsvermögen und auf die Einschätzung der geforderten Eigenschaften herrscht und im Vergleich zu anderen Standorten größere Sicherheitsreserven vorhanden sind.

Inwieweit ein Teilgebiet die gestellten Anforderungen erfüllt, wird mit den Bewertungsstufen „günstig“, „bedingt günstig“ und „weniger günstig“ festgelegt. Jedes Kriterium erhält in jedem Teilgebiet eine der drei (ausnahmsweise zwei) Bewertungsstufen. Allerdings ist nicht jede Anforderung in den einzelnen Gebieten von gleich großer Bedeutung. Der AkEnd schlägt deshalb vor, eine Beurteilung der Anforderungen und Kriterien über drei Gewichtungsgruppen durchzuführen. Die Gewichtungsgruppe 1 hat dabei den größten Einfluss auf die zusammenfassende Bewertung der geologischen Situation. Die Teilgebiete müssen dabei die Kriterien und Anforderungen in besonders hohem Maße erfüllen. Gewichtungsgruppe 2 dient der Differenzierung in der Gesamtbewertung, sollten Teilgebiete, die in der Gewichtungsgruppe 1 annähernd gleich geeignet erscheinen. Allerdings müssen „besonders günstige“ Teilgebiete auch in den Gewichtungsgruppen 2 und 3 gute Ergebnisse erzielt haben. Die Anforderungen der Gewichtungsgruppe 3 haben den geringsten Einfluss, da deren Bedeutung oft erst in der vorangeschrittenen Endlagerplanung und auf standortspezifischer Erkundung eingeschätzt werden kann. Nach Einschätzung des AkEnd sollen Anforderungen und Kriterien an ein geeignetes Teilgebiet wie folgt eingeteilt werden:

Gewichtungsgruppe 1 – Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises

Kein oder langsamer Transport von Grundwasser im Endlagerniveau:

Erreicht werden soll eine geringe Migration von Schadstoffen aus dem Endlager, lange Grundwasserlaufzeiten und somit Radionuklidtransportzeiten. Dazu soll der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen bestehen, die eine geringe Durchlässigkeit besitzen.

Nach eigener Einschätzung muss allerdings zwischen Grundwasserzirkulation in Tonsteinen oder im Granit und dem Vorkommen saliner Lösungen im Salz unterschieden werden, da im Salzkörper kein Grundwasser im eigentlichen Sinn transportiert werden kann. Das bedeutet, dass ein möglicher Standort im Salz dieses Kriterium immer erfüllen wird.

Günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich:

Das Endlager sollte von den barrierewirksamen Gesteinen des einschlusswirksamen Gebirgsbereich komplett umschlossen sein. Dieser muss dafür über eine räumliche Ausdehnung verfügen, die das Volumen des geplanten Endlagers übersteigt. Die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollte in möglichst großer Teufe liegen und der hydraulische Gradient innerhalb kleiner als 10^{-2} sein.

Gute räumliche Charakterisierbarkeit:

Die Gesteinstypen und deren charakteristischen Eigenschaften sollten möglichst homogen über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verteilt sein. Deren tektonische Überprägung, erkennbar an Bruch- und Faltentektonik muss möglichst gering sein. Möglichst großräumige Verfaltungen der Schichten, die unterschiedliche mechanische und hydraulische Eigenschaften aufweisen, sind dagegen günstig. Der Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte großräumig einheitlich oder sehr ähnlich aufgebaut sein.

Gute Prognostizierbarkeit:

Die Charakteristika des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in Bezug auf dessen Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit sollten über den Zeitraum von einer Million Jahre nahezu konstant bleiben.

Gewichtungsgruppe 2 – Absicherung des Isolationsvermögens

Gute gebirgsmechanische Voraussetzungen:

Es sollten keine sekundären Permeabilitäten außerhalb der Auflockerungszone um die aufgefahrenen Hohlräume entstehen.

Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten:

Die Barrierenwirkung des Gesteins gegenüber Fluiden oder Gasen sollte bekannt sein. Das Gestein sollte eine plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen und Risse bzw. Rissysteme geohydraulisch und geomechanisch wirksam verschließen können.

Gewichtungsgruppe 3 – Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften

Gute Gasverträglichkeit:

Die Gasentwicklung durch die Abfälle und der dadurch entstehende Druck müssen möglichst gering sein.

Gute Temperaturverträglichkeit:

Eine Einwirkung auf das Gestein um die Einlagerungskammern mit einer Temperatur kleiner 100 °C darf nicht zu einer Mineralumwandlung im Gestein und somit zu einer Verringerung der Barrierenwirksamkeit führen. Auch eine thermomechanisch induzierte Sekundärpermeabilität außerhalb der Auflockerungszone sollte möglichst eng begrenzt sein.

Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden:

Die Gesteine im Endlagersystem sollen ein hohes Sorptionsvermögen ($\geq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$) zum Rückhalt möglicher austretender Radionuklide besitzen. Gleichzeitig sollte der Gehalt an Mineralphasen, die eine große reaktive Oberfläche besitzen möglichst hoch sein.

Günstige hydrochemische Verhältnisse:

Die vorhandenen Wässer im Wirtsgestein und im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollten mit den Gesteinen im chemischen Gleichgewicht stehen. Ein pH-Wert von 7-8 und geringe Gehalte an Kolloiden, Komplexbildnern und Karbonaten sollten vorhanden sein.

2.5 Abschlussbericht der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“

Laut § 3 StandAG soll die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ das Standortauswahlverfahren vorbereiten und hierzu Grundsatzfragen klären. Ergebnis dieses Vorgangs ist der im Juli 2016 veröffentlichte Abschlussbericht. Die Kommission vergleicht darin beispielsweise unterschiedliche Entsorgungsoptionen, Endlagervarianten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen und befasst sich mit Fragen der Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit. Darüber hinaus werden im Abschlussbericht Entscheidungskriterien (Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, Abwägungskriterien sowie Sicherheitsuntersuchungen) benannt.

Ziel des Verfahrens ist laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) ein sicher verschlossenes Bergwerk mit der Möglichkeit der Reversibilität. Dadurch soll eine Fehlerkorrektur möglich gemacht werden, Vertrauen in den Prozess und eine Handlungsmöglichkeit für zukünftige Generationen geschaffen werden. Ebenfalls sollen Rückholbarkeit und Bergbarkeit im Hinblick auf größtmögliche Sicherheit gewährleistet sein. Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit muss nach KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) einen dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstiger negativer Auswirkungen der v.a. hoch radioaktiven Abfallstoffe für den Zeitraum eine Million Jahren geben können.

2.5.1 Prozessweg der Standortauswahl

Im Abschlussbericht (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016) wird die Standortauswahl mit fünf Etappen beschrieben:

1. Standortauswahlverfahren: Beginn ist 2017 mit einem klar definierten Vorgehen (Auswahlkriterien, Sicherheitsanforderungen, Öffentlichkeitsarbeit, Behördenstruktur, etc.); Ziel ist die Ausweisung von Standorten oder Standortregionen mit der bestmöglichen Sicherheit für den Einschluss der v.a. hoch aktiven Abfallstoffe.
 - **Phase 1**: Grundlage ist die weiße Landkarte Deutschlands. Es werden Regionen aus dem Verfahren genommen, auf die Ausschlusskriterien zutreffen oder Mindestanforderungen nicht erfüllen (Schritt 1). Die verbleibenden Regionen werden anhand von geologischen Abwägungskriterien weiter eingegrenzt (Schritt 2). In Anschluss werden die verbleibenden Gebiete mit

einer vertieften geologischen Abwägung (sicherheitsgerichtete Kriterien gelten hierbei vor planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien) und der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung verglichen. Ziel ist die Identifizierung einer Anzahl von in Frage kommenden Standorten oder Standortregionen für die übertägige Erkundung (Schritt 3). Konnten Aspekte durch die vorliegenden Daten nicht geklärt werden, können Daten nacherhoben werden.

- **Phase 2:** Die ausgewählten Standorte bzw. –Regionen werden übertägig erkundet. Ein Vergleich für die Auswahl zur untertägigen Erkundung wird durch Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, Abwägungskriterien sowie durch eine weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsanalyse gewährleistet. Ziel ist eine Auswahl an möglichen Standorten oder Standortregionen, welche untertägig erkundet werden sollen.
 - **Phase 3:** Nach der untertägigen Erkundung kann eine umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchung erstellt werden. Durch einen abwägenden Vergleich der verbleibenden Standorte bzw. –Regionen soll der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ausgewählt werden. Das Standortauswahlverfahren wird mit dem Gesetzesbeschluss bzgl. des Standortes beendet.
2. Bergtechnische Erschließung des Standortes: Hierzu gehören ein Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie die Erstellung eines Langzeitsicherheitsnachweises. Es werden übertägige Anlagen und Transportwege wie Schächte und Rampen erschlossen. Die Einlagerung sowie die Überwachung (Monitoring) werden „kalt“ geprobt, um die technischen Voraussetzungen für die spätere Einlagerungsphase gewährleisten zu können.
 3. Einlagerung der radioaktiven Abfälle in das Endlagerbergwerk: Die Behälter werden je nach gewähltem Einlagerungskonzept in das Bergwerk verbracht. Die befüllten Bereiche des Bergwerks werden im Anschluss daran gemäß der Kriterien für die Langzeitsicherheit verfüllt. Eine Wiederöffnung und Rückholung muss in einem angemessenen Zeitrahmen (dieser entspricht z.B. in etwa der Dauer der Einlagerung) gewährleistet sein. Dies gilt ebenfalls für die Bauweise der Behälter.
 4. Beobachtung vor Verschluss des Endlagerbergwerks: Die Einlagerung des Bergwerks ist abgeschlossen, das Bergwerk selbst ist zugänglich. Die Entwicklungen untertage (Temperatur, Bewegungen im Wirtsgestein, etc.) werden überwacht (Monitoring). Der Zeitpunkt für den endgültigen Verschluss des Bergwerks bzw. über die Dauer des Offenhaltungsbetriebs soll von der zukünftigen Generation entschieden werden.

5. Verschlossenes Endlagerbergwerk: Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfallstoffe ist hiermit gewährleistet. Ein Monitoring ist, abhängig vom gewählten Überwachungskonzept, weiterhin möglich. Des Weiteren ist eine Bergung der Behälter möglich, solange der Standort bekannt, die Behälter in bergbarem Zustand und die technischen sowie gesellschaftlichen Voraussetzungen gegeben sind.

2.5.2 Inhalt und Bedeutung von Sicherheitsuntersuchungen

Nach KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) beschreiben Sicherheitsuntersuchungen das Verhalten des Endlagersystems in unterschiedlichen Situationen. Dabei werden Unsicherheiten der Datenlage, Fehlfunktionen sowie mögliche zukünftige Entwicklungen mit in die Überlegung einbezogen. Das Ergebnis umfasst eine Analyse der Zuverlässigkeit der sicherheitsgerichteten Funktionen und die Robustheit des Endlagers. Darüber hinaus werden diejenigen geologischen Sachverhalte identifiziert, welche sich positiv oder negativ auf das Endlagersystem auswirken. Dabei wird ebenfalls deutlich gemacht, welche geologischen Situationen Einwirkungen auf die Langzeitsicherheit haben. Der Unterschied zwischen einer Sicherheitsuntersuchung und einem Langzeitsicherheitsnachweise ergibt sich nach KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) durch die unterschiedliche Datenlage bzw. die Kenntnisse bzgl. des Systems. Deshalb steht der Langzeitsicherheitsnachweise erst am Ende des Verfahrens, da zu Beginn oder in den ersten Phasen, keine ausreichenden Kenntnisse vorliegen (können). Der Detailgrad der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nimmt im Laufe des Verfahrens durch die ausgeführten Erkundungen zu. Dementsprechend sind sowohl das Endlager- als auch das Sicherheitskonzept jeweils zu kontrollieren und anzupassen, um zu jeder Zeit dem Stand von Wissenschaft und Technik zu entsprechen.

Grundlagen einer Sicherheitsuntersuchung

Um eine Sicherheitsuntersuchung erstellen zu können, müssen laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) Abfallmenge, Abfallart und –Eigenschaften bekannt sein. Darüber hinaus muss die geologische Situation an der möglichen Standortregion bzw. am möglichen Standort bekannt sein oder müssen während des Verfahrens erbracht werden. Ein Ausschluss eines Standortes wegen zu geringer Kenntnisse ist nicht zulässig. Das übergeordnete Ziel des Einlagerungsprozesses ist der vollständige und sichere Einschluss der

Abfallstoffe mit gegebenenfalls nur geringfügiger Freisetzung innerhalb des gewählten Nachweiszeitraums von einer Million Jahre. Das Sicherheitskonzept zum gewählten Endlagerkonzept wird standortspezifisch mit zunehmendem Kenntnisstand und Informationsgewinn weiterentwickelt (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016).

Vorschlag einer Methodik zur Erstellung einer Sicherheitsuntersuchung

Durch die Sicherheitsuntersuchung soll nach KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) der Nachweis, dass der sichere Einschluss im Nachweiszeitraum gewährleistet ist, ermöglicht werden. Darüber hinaus dient sie dem Vergleich der in der jeweiligen Etappe verbliebenen Standorte bzw. Standortregionen. Es werden dazu das Endlagersystem in seiner Gesamtheit und alle für die Sicherheit relevanten Bestandteile betrachtet und bewertet. Die Standorte (bzw. Regionen) werden dazu anhand von Kriterien auf Grundlage von Sicherheitsindikatoren verglichen.

Im Wesentlichen folgen die Sicherheitsuntersuchungen folgenden Schritten (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016):

1. Anfertigung eines Sicherheits- und Nachweiskonzepts, angepasst an die vorliegende geologische Situation und an die Phase des Auswahlverfahrens. Für die Erstellung eines Sicherheitskonzepts sollen bereits bestehende Konzepte (auch aus dem Ausland, Stand von Wissenschaft und Technik) zur Grundlage genommen werden. In den darauf folgenden Phasen sind dieses erste Konzept entsprechend weiterzuentwickeln und die Sicherheitsfunktionen der darin vorkommenden Komponenten auszuweisen
2. Erstellung eines (vorläufigen) Endlagerkonzepts, welches dem Sicherheitskonzept entspricht: Das in diesem Zusammenhang und für jedes in Frage kommende Wirtsgestein erarbeitete Endlagerkonzept wird im Verfahren weiterentwickelt. Im Abschlussbericht (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016) wird darüber hinaus vorgeschlagen, dass mehrere Konzepte pro Standortregion entwickelt werden sollten
3. Erarbeitung einer geowissenschaftlichen und klimatischen Langzeitprognose zur Identifikation der für die Integrität bedeutsamen Prozesse und Einwirkungen
4. Einschätzung der Wahrscheinlichkeit möglicher Freisetzungseignisse und deren Konsequenzen (Phasen 2 und 3, nicht Phase 1)

5. Benennung von Ungewissheiten und vorhandenen Sicherheitsreserven, Bewertung der Robustheit und der Sicherheit des gewählten Endlagersystem
6. Einschätzung des FuE- sowie des weiteren Erkundungsbedarfs. Darüber hinaus Erarbeitung von Optimierungsmöglichkeiten.

Die Überlegungen der Schritte 4. und 5. sollen dabei verbal qualitativ und zum Teil auch quantitativ erfolgen.

Empfehlung bezüglich der vorläufigen Sicherheitsuntersuchung in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens

Laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) wird in der vorläufigen Sicherheitsuntersuchung in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens der zukünftige ewG in seiner Lokation und Ausdehnung abgeschätzt. Die Voraussetzung hierfür ist die Erfüllung des Fluiddruck- und Dilatanzkriteriums in diesem Bereich. Zusätzlich werden die Auswirkungen der Temperaturerhöhung durch die Einbringung des wärmeentwickelnden Abfalls auf das Wirtsgestein abgeschätzt. Darüber hinaus findet eine erste Untersuchung zur Robustheit der im zukünftigen Endlager eingesetzten Komponenten statt. Als Robustheit wird hierbei die Zuverlässigkeit der Komponenten bezeichnet bzw. deren Unempfindlichkeit gegen das Einwirken äußerer Einflüsse sowie gegen Abweichungen der zugrunde gelegten Parameter (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016). Die vorläufige Sicherheitsuntersuchung in Phase 1 wird durch KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) als weitgehend generisch eingeschätzt. Das Resultat der Sicherheitsuntersuchung soll als Orientierung gelten, da mit einer Vielzahl an Unsicherheiten umgegangen werden muss und das Ergebnis keine robuste Einschätzung liefern kann.

Empfehlung bezüglich der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchung in Phase 2 und der umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchung in Phase 3 des Standortauswahlverfahrens

In der vorläufigen Sicherheitsuntersuchung in Phase 1 des Auswahlverfahrens wurden laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) der ewG in seiner Ausdehnung und Lokation sowie die Auswirkungen der wärmeentwickelten Abfälle auf das Wirtsgestein abgeschätzt. Darüber hinaus wurden die Komponenten des Endlagers auf ihre Robustheit hin untersucht.

In den Phasen 2 und 3 sollen laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) zusätzliche Untersuchungen durchgeführt werden. Diese beziehen sich u. a. auf:

- den ewG (Erfüllung Fluiddruck- und Dilatanzkriterium)
- dessen umgebendem Gestein (Erfüllung Fluiddruckkriterium, thermomechanische Berechnungen, Auswirkungen von Erdbeben, etc.)
- das Deckgebirge (generelle Untersuchungen, Geochemische Veränderungen im GW-Leiter durch Temperaturerhöhung im Endlagerbergwerk)
- Überlegungen zum Endlagerkonzept (u. a. Einlagerungsmaschinen, Wetterführung, Monitoring, Optimierung der Komponenten, Kompaktion des Versatzmaterials, thermomechanische Auslegungsberechnungen, Entwurf eines Schachtverschlusses inkl. Nachweis Tragfähigkeit, Rissbildung, etc., Konzeptentwicklung Rückholung und Bergung)
- Überlegungen zu möglichen Prozessen (u. a. Gasentwicklung, Behälterkorrosion, Freisetzungsberechnungen, Untersuchungen zu Kritikalität)

Laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) sind auch diese Sicherheitsuntersuchungen mit Unsicherheiten behaftet. Quantitative Einschätzungen sind auch mit zunehmendem Informationsgewinn und Kenntnisstand oft nicht oder noch nicht möglich. In solchen Fällen werden diejenigen sicherheitsrelevanten Aspekte qualitativ beschrieben.

Die weiterentwickelten und umfassenden Sicherheitsuntersuchungen der Phasen 2 und 3 dienen nach KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) zusammen mit den Abwägungskriterien zur Sicherheit und technischen Durchführbarkeit einer Gesamtbewertung eines Standortes. Auf dieser Basis soll ein Vergleich unterschiedlicher Standorte möglich gemacht werden. Dabei werden die erwartete Entwicklung des Endlagersystems und dessen Robustheit miteinbezogen. Darüber hinaus wird die Variabilität und Unsicherheit der verwendeten Datensätze berücksichtigt sowie Modellunsicherheiten. Laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) gilt, dass Standorte aufgrund von Dosisdifferenzen, welche durch Ungewissheiten der Ausgangsdaten verursacht werden, nicht aus dem Verfahren ausgeschlossen werden dürfen. In den Phasen 2 und 3 sollen Dosis- und Freisetzungsrechnungen erstellt werden. Diese sollen zur Abschätzung dienen, ob ein Standort generell das Potential zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen besitzt.

2.5.3 Kriterien und ihre Bedeutung im Auswahlverfahren

Um einen Vergleich zwischen den Standorten bzw. Standortregionen während des Auswahlverfahrens zu ermöglichen und abschließend eine Standortentscheidung treffen zu können, wird sich im Laufe des Verfahrens verschiedener Kriterien bedient. Die geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und geowissenschaftlichen Mindestanforderungen werden laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) bereits im Vorfeld des Verfahrens festgelegt und sind währenddessen immer gültig. Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sollen eine bessere bzw. weniger gute Eignung eines Standortes beurteilen und einen Vergleich verschiedener Standorte zueinander ermöglichen. Am Ende der Phase 1 können so, zusammen mit den durchgeführten Sicherheitsuntersuchungen, Teilgebieten mit günstigen geologischen Rahmenbedingungen benannt werden. Auch die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind im Vorfeld des Verfahrens festzulegen. Die Prüfkriterien stellen Anforderungen an die Ergebnisse der untertägigen Erkundung, welche mindestens erfüllt werden müssen. Sie sind somit standortbezogen und sollen geologische Sachverhalte, welche auf Grundlage der übertägigen Erkundung als sicherheitsrelevant gelten, beurteilen. Die Prüfkriterien, welche nach KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) auch als „standortspezifische Ausschlusskriterien“ bezeichnet werden, können erst während des Verfahrens entwickelt werden, müssen aber rechtzeitig vor Durchführung der untertägigen Erkundung festgelegt sein. Planungswissenschaftliche Kriterien stellen immer Abwägungskriterien dar und sind der Langzeitsicherheit untergeordnet. Sie sind wiederum vor Beginn des Auswahlverfahrens festzulegen und dienen der Einengung von geeigneten (in Bezug auf die Sicherheit) Standortregionen bzw. Teilgebieten (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016). Die sozioökonomische Potentialanalyse ist der Langzeitsicherheit ebenfalls untergeordnet und dient nach KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) der Bewertung sozioökonomischer Einflüsse. Grundsätzlich gilt hier der Grundsatz, dass der Bau eines Endlagers der Entwicklung einer Region nicht zum Nachteil gereichen soll.

Nachfolgend wird der Fokus der Betrachtung auf die geowissenschaftlichen Kriterien gelegt. Dabei sollen in Tab. 2 die geowissenschaftlichen Mindestanforderungen, Ausschlusskriterien sowie Abwägungskriterien nach Vorschlägen des AKEND (2002), der KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) und der Entsorgungskommission (ESK 2015) verglichen werden.

Tab. 2: Vergleich der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien. Grundlage des Vergleichs ist der Bericht des AkEnd

Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien nach AKEND (2002)	ESK (2015)	KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016)
<u>Großräumige Vertikalbewegung</u> Ausschluss bei einer Hebungsrate von mehr als 1 mm/Jahr	Kriterium in der Praxis verzichtbar, weil geogen induziert in Dtl. nicht erreicht	Ergänzung: Eine Standortregion soll möglichst geringe tektonisch bedingte großräumige Hebungen aufweisen
<u>Aktive Störungszonen</u> Im Endlagerbereich dürfen keine aktiven Störungszonen vorhanden sein + Sicherheitsaufschlag. „Aktiv“: Bewegungen Zeitraum Rupel bis heute, seismische Ereignisse, Fluidtransport	Ergänzung: Datierung von Bewegungen an geologischen Störungen auch über Fluideinschlüsse entlang von Störungszonen möglich. Auch aseismische Bewegungen müssen berücksichtigt werden	Ergänzung: Atektonische und aseismische Vorgänge, die zu ähnlichen Konsequenzen führen, sind wie ebenso zu behandeln
<u>Seismische Aktivität</u> Erwartete seismische Aktivitäten dürfen nicht höher sein als Erdbebenzone 1 (DIN 4149)	Übereinstimmung, Eine Verschärfung der Einschätzung des AkEnd wird als nicht sinnvoll angesehen	Übereinstimmung, allerdings Verwendung einer aktuelleren Erdbebenzonenkarte nach DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (ehemals DIN 4149)
<u>Vulkanische Aktivität</u> Kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus in der Endlagerregion erlaubt. Sicherheitssaum 10 km	Übereinstimmung	Übereinstimmung
<u>Grundwasseralter</u> Im ewG dürfen keine jungen Grundwässer vorhanden sein (kein Tritium oder ^{14}C)	Grundsätzlich Zustimmung, aber aufgrund unzureichender Datendichte wird Anwendung als Mindestanforderung empfohlen.	Übereinstimmung

Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	<u>Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit</u> Keine Schädigung im Bereich Endlagers (insb. ewG) erlaubt, welche negative Auswirkungen auf Spannungszustand oder Permeabilität zur Folge haben. Zukünftiger ewG darf nur in unvermeidlichem Ausmaß verritzt und seine Integrität nicht gefährdet werden.
Geowissenschaftliche Mindestanforderungen nach AkEND (2002)	ESK (2015)	KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016)
<u>Gebirgsdurchlässigkeit</u> Im ewG muss eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner 10^{-10} m/s herrschen	Ergänzung: Separate Entwicklung für kristalline Gesteinstypen notwendig	Ergänzung: Auch überlagernde Gesteinsschichten können die Funktion des ewG übernehmen.
<u>Mächtigkeit ewG</u> Mindestmächtigkeit 100 m	Ergänzung: Mächtigkeit in direktem Zusammenhang zu Migrationszeiten und –raten. Wenn keine Migration erwartet wird, steht Integrität im Vordergrund.	Übereinstimmung
<u>Minimale Tiefenlage ewG</u> Teufe Oberfläche ewG muss mindestens in 300 m liegen	Ergänzung: Angabe für ganz Dtld. zu ungenau wegen differenzierter möglicher Prozesse im Nachweiszeitraum. Ziel ist der Erhalt des ewG über 1 Mio. Jahre.	Ergänzung: Oberfläche ewG muss tiefer als die größte zu erwartende Tiefe der möglichen Ereignisse im Nachweiszeitraum liegen
<u>Maximale Tiefenlage ewG</u> Teufe Endlagerbergwerk nicht größer als 1500 m	Übereinstimmung. Zusätzliche Begründung für Tiefenbegrenzung ist der zunehmende Gebirgsdruck bei steigender Tiefenlage	Kriterium entfällt: Tiefe ergibt sich aus lokalen Gegebenheiten. Endlagerbergwerk sollte in 500-1000 m liegen, kann aber je nach Konzept auch tiefer geplant sein.

<u>Flächenmäßige Ausdehnung ewG</u> Ausdehnung muss eine Realisierung des Endlager möglich machen (ca. 3 km ² für Salz)	Übereinstimmung, wenn nur wärmeentwickelnde Abfälle betrachtet werden. Grundsätzlich Orientierung an der Abfallmenge	Ergänzung: zusätzliche Fläche für Maßnahmen zur Rückholung oder Bergung nötig. Zusätzlich evtl. Abfallmengen aus Urananreicherung und dem Salzstock Asse
<u>Gebirgsschlaggefährdung</u> Das Wirtsgestein darf nicht gebirgsschlaggefährdet sein, um die nötige Sicherheit für Auffahrung und Betrieb des Endlagers gewährleisten zu können	Ergänzung: Generell sollten geotektonische Bereiche gemieden werden, in denen es zu großräumigen und spontanen Verbrüchen kommen kann	Nicht vorhanden
<u>Erkenntnisse zum ewG im Nachweiszeitraum</u> Es dürfen keine Erkenntnisse vorliegen, welche an den Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des ewG über den Nachweiszeitraum Zweifel aufkommen lassen	Übereinstimmung und Betonung der besonderen Wichtigkeit dieses Kriteriums	Übereinstimmung
Geowissenschaftliche Abwägungskriterien nach AKEND (2002) Gewichtungsgruppe 1 – Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises	ESK (2015)	KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016)
<u>Kein oder langsamer Transport durch GW im Endlagerniveau</u> Die Abstandsgeschwindigkeit sollte deutlich kleiner als 1 mm/Jahr, der effektive Diffusionskoeffizient kleiner als 10 ⁻¹¹ m ² /s sein	Übereinstimmung	Übereinstimmung, aber Daten vermutlich in der ersten Phase nicht vorhanden, deshalb Einschätzung der GW-Strömung anhand charakteristischer Durchlässigkeiten der jeweiligen Wirtsgesteinstypen.

		<p>Weitere Indikatoren für das Fehlen von GW-Strömung z.B. Temperaturverteilung, dauerhaft „trockenes“ Gestein.</p> <p>Ausdehnung ewG muss an die Diffusionsgeschwindigkeit der Radionuklide angepasst sein (kleiner $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ wird als „günstig“ gewertet)</p>
<p><u>Günstige Konfiguration von Wirtsgestein und ewG</u></p> <p>Die Mächtigkeit des Einlagerungsbereichs muss die Isolation für 1 Mio. Jahre gewährleisten können. Der Einlagerungsbereich soll von den Gesteinen des ewG umschlossen sein. Die Teufe soll möglichst groß und die Ausdehnung ausreichend sein. Der spezifische hydraulische Gradient unterschreitet den Wert von 10^{-2}</p>	<p>Mächtigkeit orientiert sich an Berechnungen zur Fließstrecke in 1 Mio. Jahren. Gradient bei geringdurchlässigen Gesteinen deutlich größer (Faktor 10). Teufe muss standortbezogen gewählt und die Ausdehnung am Abfallvolumen orientiert sein. Kriterium zum hydraulischen Gradienten könnte dem Ausschlusskriterium „Gebirgsdurchlässigkeit“ zugeordnet werden.</p>	<p>Qualität der Barrierenwirkung abhängig vom Umschließungsgrad des ewG. Übereinstimmung bei Teufe (mit Beachtung standortspezifischer Szenarien). Ausdehnung muss Konzepte für Rückholungskonzepte beinhalten. Der Abstand zu hydraulischen Potentialbringern sollte möglichst groß und die Gebirgsdurchlässigkeit klein sein.</p>
<p><u>Gute räumliche Charakterisierbarkeit</u></p> <p>Charakteristische Eigenschaften sollen möglichst homogen verteilt und Gesteine des ewG möglichst einheitlich entwickelt sein. Am Standort soll eine geringe tektonische Überprägung vorhanden sein. Salzstrukturen sollten möglichst großräumige Verfaltungen aufweisen.</p>	<p>Übereinstimmung, Kriterium könnte aber schärfer gefasst werden: „Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit“</p>	<p>Übereinstimmung, neuer Indikator: „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im ewG/ Wirtsgesteinskörper“</p>
<p><u>Gute Prognostizierbarkeit</u></p> <p>Keine wesentlichen Änderungen von Mächtigkeit, Ausdehnung und</p>	<p>Präzisierung notwendig. Kriterium: „Die wesentlichen sicherheitsrelevanten Merkmale des ewG sollen sich seit einigen Millionen Jahren nicht wesentlich verändert haben“</p>	<p>Übereinstimmung</p>

Gebirgsdurchlässigkeit im Bereich des ewG in den letzten Millionen Jahren		
Geowissenschaftliche Abwägungskriterien nach AKEND (2002) Gewichtungsgruppe 2 – Absicherung des Isolationsvermögens	ESK (2015)	KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016)
<u>Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen</u> Möglichst geringe Neigung zu Sekundärpermeabilitäten (außerhalb EDZ)	Übereinstimmung	Übereinstimmung
<u>Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten</u> Repräsentative Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit sollten gleich und die Barrierenwirkung des Gebirges aus geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrungswerte ableitbar sein. Die Deformationsfähigkeit sollte plastisch-viskos sein. Risse sollten nach Risssschließung geohydraulisch verschlossen und geomechanisch wirksam verheilt sein.	Übereinstimmung, aber Anwendung auch auf zukünftige Situationen und Entwicklungen	Übereinstimmung, aber Gebirgsdurchlässigkeit sollte möglichst nur in geringem Maße veränderlich sein.
Geowissenschaftliche Abwägungskriterien nach AKEND (2002) Gewichtungsgruppe 3 – Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften	ESK (2015)	KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016)
<u>Gute Gasverträglichkeit</u>	Übereinstimmung. Aktuelle Forschung dazu muss verfolgt werden. Bei Einlagerung	Neue Formulierung der Anforderung: „Gute Bedingung zur Vermeidung oder Minimierung

Möglichst geringe Gasbildung und möglichst geringer Druckaufbau durch Gasbildungsprozesse	unterschiedlicher Abfallarten zusätzliche Problematik.	der Gasbildung“; das zugehörige Kriterium („möglichst geringe Gasbildung unter Endlagerbedingungen“) ist im Gegensatz zu AkEnd ungenauer.
<u>Gute Temperaturverträglichkeit</u> Im Gestein, welches die Einlagerungskammern umgibt, darf es bei Temperaturen von weniger als 100 °C nicht zu Mineralumwandlungen kommen. Neigung zur Ausbildung von thermomechanisch induzierten Sekundärpermeabilitäten sollte räumlich eng begrenzt sein	Übereinstimmung	Ableitung von Kriterien muss Temperaturbeständigkeit des Wirtsgesteins (in Hinblick auf Mineralumwandlungen) sowie die temperaturinduzierte Bildung von Permeabilitäten und deren Ausdehnung berücksichtigen. Bis die maximal möglichen Temperaturen des jeweiligen Wirtsgesteins zuverlässig untersucht wurden, gilt eine Maximaltemperatur von 100 °C für die Behälteraußenflächen.
<u>Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden</u> Sorptionsfähigkeit der Gesteine soll möglichst hoch sein, der Sorptionskoeffizient (Kd-Wert) bei größer oder gleich 0,001 m ³ /kg liegen. Möglichst hoher Gehalt an Mineralphasen mit reaktiver Oberfläche in den Gesteinseinheiten	Beurteilung muss das Zusammenwirken unterschiedlicher Sicherheitsfunktionen berücksichtigen (z.B. Ton als Verfüllmaterial)	Zusätzliches Kriterium: Ionenstärke des GW im ewG soll möglichst hoch sein, um Migration von an Kolloiden gebundenen Radionukliden zu verhindern oder zu minimieren. Die Öffnungsweiten der Gesteinsporen soll gering um im Nanometerbereich veranschlagt sein
<u>Günstige hydrochemische Voraussetzungen</u> GW im Wirtsgestein/ ewG soll sich mit dem Gestein im chemischen Gleichgewicht befinden. Das Tiefenwasser soll einen pH-Wert von 7-8 und günstige Redoxbedingungen aufweisen. Der Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern sowie die Karbonatkonzentration sollen möglichst gering sein.	Präzisierung: Anforderung bedeutsam sowohl in Hinblick auf mögliche Beschädigung der Barrieren als auch auf Freisetzung- und Migrationsprozesse. Präzisierung hängt vom Endlagerkonzept und vom Wirtsgestein ab. Außerdem müssen Änderungen berücksichtigt werden, z.B. Stoffinventar bei unterschiedlichen Abfallarten oder Betonausbauten	Die Überprüfung der günstigen hydrochemischen Voraussetzungen erfordert standortspezifische Informationen, welche erst in späteren Verfahrensschritten bereitgestellt werden können

Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	<u>Schutz des ewG durch günstigen Aufbau des Deckgebirges</u> Es soll eine möglichst mächtige, vollständige und geschlossene Überdeckung des ewG mit GW-hemmenden Einheiten vorhanden sein. Möglichst Fehlen von strukturellen Komplikationen im Deckgebirge
-----------------	-----------------	---

3 Standortauswahlgesetz – §§ 13, 14, 15: Auswahl möglicher Standortregionen und Auswahl für übertägige Erkundung

Die Auswahl möglicher Regionen erfolgt laut § 13 Abs. 1 StandAG durch den Vorhabenträger, der in Betracht kommende Standortregionen ermitteln soll. Dies geschieht auf Basis von Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, Abwägungskriterien und weiteren Entscheidungsgrundlagen, die im Vorfeld von der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ empfohlen und vom Deutschen Bundestag als Gesetz beschlossen werden (§ 4 Abs. 5 StandAG). Der Vorhabenträger soll laut § 13 Abs. 1 StandAG im Zuge des Auswahlprozesses zunächst ungünstige Gebiete benennen, die anhand der Sicherheitsanforderungen, der geowissenschaftlichen, wasserwirtschaftlichen und raumplanerischen Ausschlusskriterien offenkundig ungünstige Merkmale aufweisen oder die den § 4 Abs. 5 StandAG durch die Kommission festgelegten Mindestanforderungen nicht genügen. Durch den Ausschluss ungünstiger Gebiete und die Anwendung wirtsgesteinsunabhängiger Abwägungskriterien sollen so Vorschläge für in Betracht kommende Standorte benannt werden.

Nach § 13 Abs. 2 muss der Vorhabenträger für die ausgewählten Standortregionen „repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen“ zu erstellen, die laut § 4 Abs. 5 StandAG wieder den Anforderungen der Kommission entsprechen müssen.

Der erste Verfahrensschritt endet gemäß § 14 StandAG mit der Überprüfung der Standortvorschläge zur übertägigen Erkundung und den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen durch das BfE. Nach einer weiteren Prüfung durch das BMUB werden die Vorschläge und alle weiteren erforderlichen Unterlagen, insbesondere die Ergebnisse des gesellschaftlichen Begleitgremiums und der Öffentlichkeitsbeteiligung durch die Bundesregierung an den Deutschen Bundestag und den Bundesrat weitergereicht. Die Entscheidung für die übertägig zu erkundenden Standorte fällt durch Bundesgesetz, wobei den betroffenen Gemeinden und Grundstückseigentümern Gelegenheit zur Stellungnahme eingeräumt wird.

Laut AkEnd (2002) sind ungeeignete Gebiete solche, in denen ein Endlagersystem in ungefähr 1000 m Tiefe während des Isolationszeitraums wesentlich beeinträchtigt oder in denen die Entwicklung des Endlagersystems nicht vorhergesagt werden kann.

Die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ erarbeitete die erforderlichen Kriterien auf Basis des AkEnd-Berichts (2002).

3.1 Identifizierung der sicherheitsrelevanten geowissenschaftlichen Sachverhalte

Der AkEnd-Bericht stellt die erste umfassende Handlungsempfehlung zur Standortauswahl für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle in Deutschland dar. Der Abschlussbericht der Kommission greift diesen zum großen Teil wieder auf und überarbeitet ihn. Nachfolgend sollen lediglich auf Basis des Standortauswahlgesetzes und der BMU Sicherheitsanforderungen die unterschiedlichen Verfahrensschritte der Standortauswahl entwickelt werden. Im ersten Verfahrensschritt (§§ 13, 14, 15 StandAG) werden die für die Sicherheit eines Endlagers relevanten Sachverhalte beschrieben.

3.1.1 Mögliche Auswirkungen von Kaltzeiten für ein Endlager in norddeutschen Salzformationen

BOETTICHER ET AL. (2011) stellen in ihrem Abschlussbericht fest, dass aufgrund der vorliegenden Erfahrungen mögliche Gefährdungen identifiziert werden können, welche die Barrierenwirksamkeit beeinträchtigen können. „Nur bei gebirgsdynamischen Einwirkungen anthropogenen oder geogenen Ursprungs (Gebirgsschläge, Erdbeben) sowie bei Änderungen der Rahmenbedingungen (z.B. Wirkung von Porenwasserdrücken infolge einer Auflast, thermische Einwirkung) lässt sich ein signifikant höheres Sicherheitsrisiko hinsichtlich einer Verletzung der Integrität und Dichtheit salinarer Barrieren ableiten“ (BOETTICHER ET AL. 2011). Laut MRUGALLA (2011) ereignet sich alle 100.000 Jahre ein Klimawechsel. Die nächste Kaltzeit soll demnach in 10.000 Jahren beginnen und ihren Höhepunkt in 50.000 Jahren haben. Allerdings kann laut KELLER (2009) ein genauer Klimaverlauf nicht vorhergesagt werden, da dieser auch in den vergangenen Millionen Jahren keinem extrapolierbarem Muster gefolgt ist. Außerdem sind die Entwicklung der Zivilisation und die damit verbundene Freisetzung von Treibhausgasen, deren Auswirkungen auf zukünftige Kaltzeiten nur ungefähr abgeschätzt werden können, kaum vorherzusagen. Es muss aber mit der Möglichkeit gerechnet werden, dass eine Kaltzeit mit Eisüberföhrung wesentlich später eintritt als durch den 100.000 Jahre-Zyklus vorhergesagt (KELLER 2009).

Für die Planung eines Endlagers sollten allerdings die Auswirkungen der Treibhausgase unberücksichtigt bleiben und mit einer Veränderung des Klimas wie nach der Mittelpleistozänen Übergangszone (ungefähr vor 800.000 Jahren) gerechnet werden (KELLER 2009). Dies kann als konservative Annahme betrachtet werden. Ohne den Einfluss der Treibhausgase kann – relativ gesehen – mit einem früheren Eintreten einer Kalt- bzw. Eiszeit

gerechnet werden. Für die Abschätzung des sicheren Einschlusses wird bei Ungewissheiten eher diejenige Annahme zu Grunde gelegt, die (in Bezug auf die Sicherheit) vom ungünstigsten Fall ausgeht. Für die Betrachtung unter Vernachlässigung der Treibhausgase wird laut KELLER (2009) vorausgesetzt, dass keine außerordentlichen Zyklenwechsel im Klimaverlauf stattfinden, die astronomischen Parameter weiterhin auf ähnliche Weise Einfluss nehmen wie in der Vergangenheit und keine großen globalen Veränderungen wie Gebirgsbildungen oder Änderungen im Verlauf der Meeresströmungen stattfinden. Somit wären weite Teile Norddeutschlands in einer Million Jahre für einen Zeitraum von ca. 20.000-40.000 Jahren von Gletschern bedeckt, und es besteht weiter die Möglichkeit von zehn Kaltzeiten und deren Begleiterscheinungen (KELLER 2009).

Für die kommenden eine Million Jahre wird von der gleichen Intensität und Ausprägung der Kaltzeiten wie in der vergangenen einen Million Jahren ausgegangen (MRUGALLA 2011). In diesem Zeitraum gab es in Norddeutschland drei Kaltzeiten mit Eisüberfahrungen (Abb. 4). Die Eisüberdeckung lag vermutlich bei 700-1500 m über dem Standort Gorleben während der Saale- und der Elster-Kaltzeit. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Gletscher ins Inland bewegt haben, wird auf 75-150 m/a während der Saale-Eiszeit und 200 m/a während der Elster-Eiszeit geschätzt. Die maximalen Eisvorstöße werden auf 500-600 m/a geschätzt, wenn sich ein Teil des Gletschers auf Wasserflächen befand. Generell ist die Geschwindigkeit des vordringenden Eises abhängig von seiner Mächtigkeit bzw. der Gletschermasse (MRUGALLA 2011).



Abb. 4: Maximaler Gletschervorstoß während der letzten drei Eiszeiten (MRUGALLA 2011)

Um die Auswirkung einer Kaltzeit auf ein Endlager formulieren zu können, müssen die damit verbundenen Prozesse erklärt werden. Laut MRUGALLA (2011) unterscheidet man zwischen Inlandvereisung in randlicher Lage und einer vollständigen Inlandvereisung.

Inlandvereisung in randlicher Lage

Bei einer Inlandvereisung in randlicher Lage, wie z.B. während Weichseleiszeit für den Standort Gorleben (siehe Abb. 4), kann sich periodisch eine Eisüberdeckung ausbilden.

Ausschlaggebender sind für den Standort aber der Permafrost und dessen Auswirkungen, wie im folgenden Abschnitt dargelegt.

Permafrost und hydrologische Auswirkungen

Die meisten Begleiterscheinungen von Permafrost, wie z.B. Solifluction, verändern zwar die Oberflächenmorphologie, haben aber keine Auswirkung auf ein Endlager in mehreren hundert Metern Tiefe. Allerdings kann sich während einer Kaltzeit in 40.000-60.000 Jahren ein kontinuierlicher Permafrost im Vorfeld des Gletschers mit Mächtigkeiten von 150-200 m ausbilden, der den Grundwasserfluss in diesem Bereich stark beeinflusst (MRUGALLA 2011). Nach BOETTICHER ET AL. (2011) sind auch Permafrosttiefen von 120 bis 350 m möglich. Das Grundwasser liegt in gefrorener Form vor, bis auf lokale, nicht gefrorene Bereiche, die „Taliki“ genannt werden. Es findet keine Grundwasserneubildung statt, da oberirdisches Wasser nicht versickern und in das Grundwassersystem eingespeist werden kann. Niederschläge und Schmelzwässer würden sich somit oberflächlich bewegen und abfließen (BOETTICHER ET AL. 2011). Das Grundwasser bewegt sich in der Auftauschicht über dem Permafrost oder in den eisfreien Sedimenten unterhalb des Gletschers. Die Fließrichtung und –geschwindigkeit kann dabei von der des ursprünglichen Aquifersystems vor der Eisüberdeckung abweichen (MRUGALLA 2011). Das Grundwassereinzugsgebiet verlagert sich in eisfreie Gebiete und Regionen ohne Permafrost. Der Chemismus der Grundwässer ändert sich durch das Gefrieren des Wassers, da sich dadurch im Wasser enthaltene Stoffe in bestimmten Zonen anreichern. Diese Zonen, in welchen Wasser innerhalb des Permafrostes aufgrund des hohen Mineralgehaltes oder des hohen Umgebungsdrucks nicht gefriert, nennt man „Cryopegs“ (MRUGALLA 2011). Je nach Tiefenlage des Endlagers könnte ein Zufluss von Süßwasser in größerer Teufe zu Lösungsvorgängen am Salzstock führen. Laut BOETTICHER ET AL. (2011) wurde in norddeutschen Salzstöcken anhand von isotope-geochemischen Untersuchungen an Fluideinschüssen in verheilten Klüften festgestellt, dass das Salz während einer Kaltzeit Kontakt mit Grundwasser gehabt haben muss.

Verstärkt wird dieser Vorgang durch die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers unter glazigenen Bedingungen. Laut BOETTICHER ET AL. (2011) wurden Grundwasserflüsse während Kaltzeiten in Norddeutschland simuliert und eine 30-mal schnellere Fließgeschwindigkeit festgestellt. Ähnliche Studien wurden durch GERARDI & WILDENBORG (1999) für den Salzstock Morsleben durchgeführt und auch hier wurden verstärkte Subrosionsraten während einer Permafrostüberdeckung festgestellt. Eine von ihnen veröffentlichte Modellierung zeigt eine

mögliche Subrosion des Salzstocks von 2 m während Permafrostüberdeckung in den nächsten 150.000 Jahren.

Vollständige Inlandvereisung

Die vollständige Inlandvereisung führt nach MRUGALLA (2011) zu Veränderungen, die durch die Gletscherauflast ausgelöst werden. Dazu gehören glazialtektonisch bedingte Störungen, eine größere Erosionsleistung und die Rückbildung des Permafrost unter dem Gletscher. BOETTICHER ET AL. (2011) beschreiben die Erosionsrate eines Gletschers in vollständig vereisten Gebieten mit 1 mm/a und in gemischten glazialen und periglazialen Gebieten mit bis zu 30 mm/a. Nach BOETTICHER ET AL. (2011) ist es möglich, dass oberflächlich gebildetes Schmelzwasser durch Risse in den Randbereichen eines Gletschers bis an dessen Basis vordringen kann. Somit kann Schmelzwasser, je nach Zusammensetzung und Beschaffenheit des unterlagernden Gesteins, in den Grundwasserbereich versickern (Abb. 5). Der Grundwasserfluss wird hierbei nur durch Permafrostbereiche und von Gletschern mit einer kalten Basis gestört und abgelenkt (Abb. 5, BOETTICHER ET AL. 2011). In BOETTICHER ET AL. (2011) wird erläutert, dass eindringende Schmelzwässer Salz ablaugen können, wie es wohl im Zeitraum des jüngeren Quartär beim Salzstock Gorleben geschehen ist. Es wurde eine Ablaugung von 200-400 m Salzgestein, was ungefähr 4 km³ entspricht, abgeschätzt.

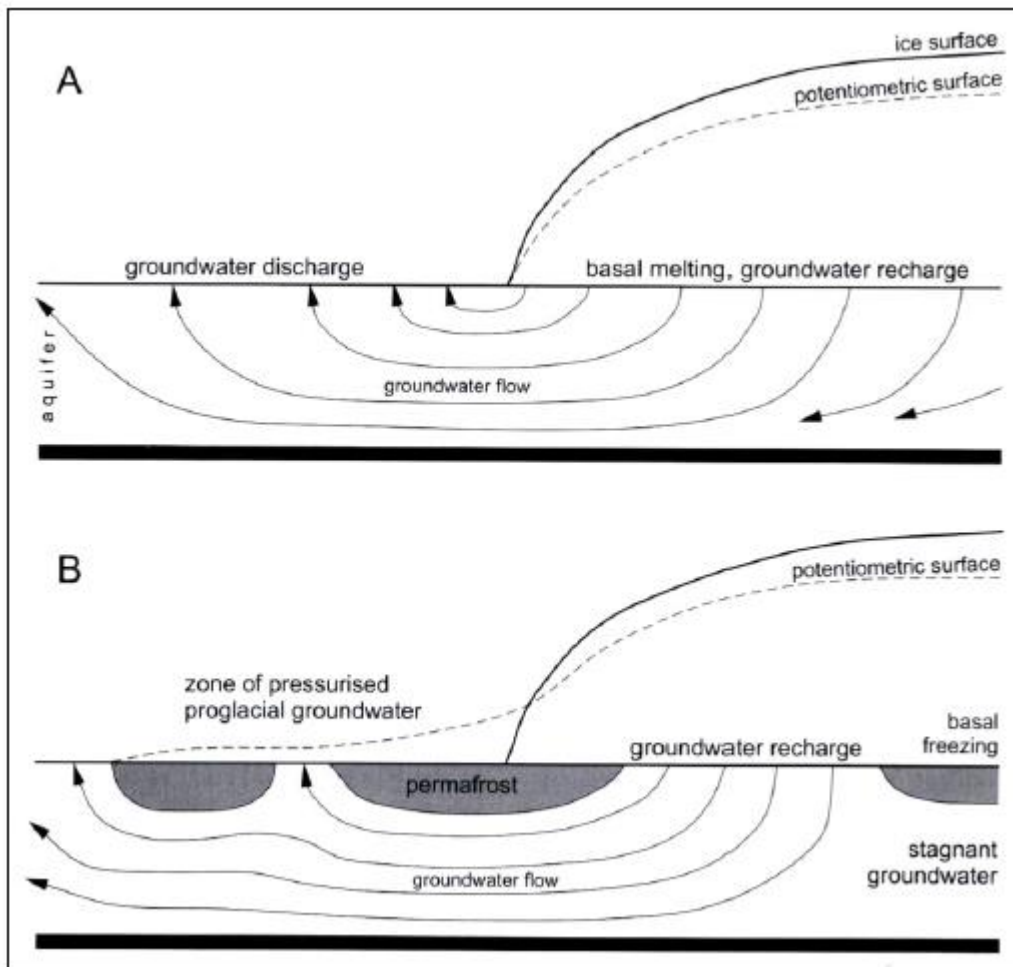


Abb. 5: Vereinfachte Darstellung der Grundwasserbewegung eines warmen (A) und eines kalten Gletschers mit Permafrostbereichen (B) aus BOETTICHER ET AL. (2011)

Außerdem kann nach einer Gletscherüberdeckung ein erneuter Aufstieg eines Salzstocks ausgelöst werden (Abb. 6). Dazu müssen allerdings genügend leicht mobilisierbare Salinargesteine im Untergrund vorhanden sein und die Auflast durch den Gletscher lange genug wirken. Laut MRUGALLA (2011) war das in den vergangenen Eiszeiten für den Standort Gorleben nicht der Fall, da keine Hinweise auf eine tektonische Bewegung in den prälster- oder elsterzeitlichen Schichten gefunden wurden.

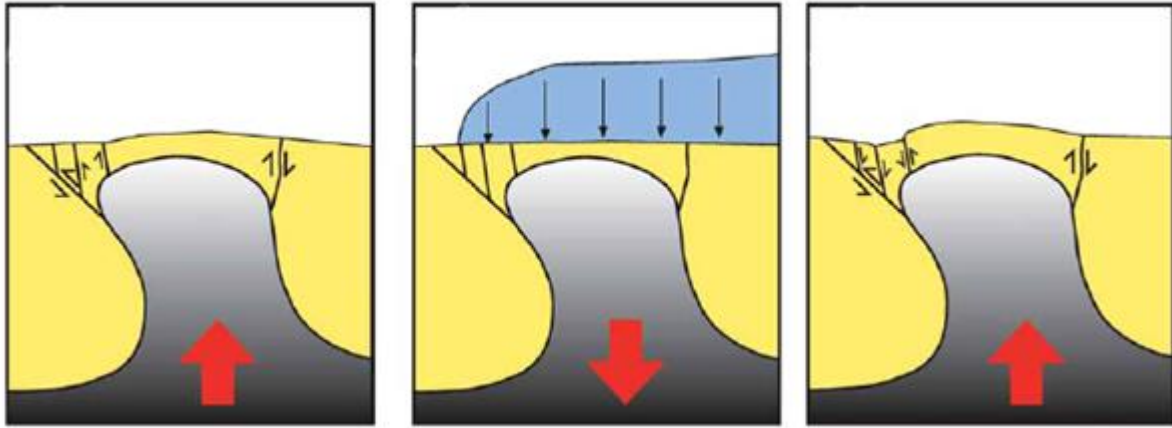


Abb. 6: Auswirkungen der Gletscherauflast auf einen Salzstock. Die Pfeile zeigen die relative Bewegung des Salzstocks an (SIROCKO ET AL. 2008)

In glazigen beeinflussten Regionen sind außerdem tektonisch bedingte Störungen bekannt, die bis in Tiefen von 200-300 m reichen können (MRUGALLA 2011). MRUGALLA (2011) beschreibt außerdem die mögliche Initiierung von Erdbeben durch eine Auflast des Gletschers und anschließender isostatischer Ausgleichsbewegung.

Nach BOULTON & CABAN (1995) kann sich eine Schwächezone durch die Gletscherbewegung bis in fast 800 m ausbilden. In den oberen Bereichen bis in 10 m Tiefe bilden sich Risse sehr steil aus. Als weitere Auswirkung wurde laut BOULTON & CABAN (1995) die Entstehung von hydromechanischen Klüften im Untergrund durch Gletscherauflast festgestellt. Im unterlagernden, durchlässigen Gestein wird ein Fluiddruck erzeugt, der die Gebirgsfestigkeit übersteigt und so Risse erzeugt. Der Bereich, in dem die Rissbildung möglich ist, kann bis in 100 m vor die Gletscherfront und in eine Tiefe von 250-400 m reichen (Abb. 7, BOULTON & CABAN 1995).

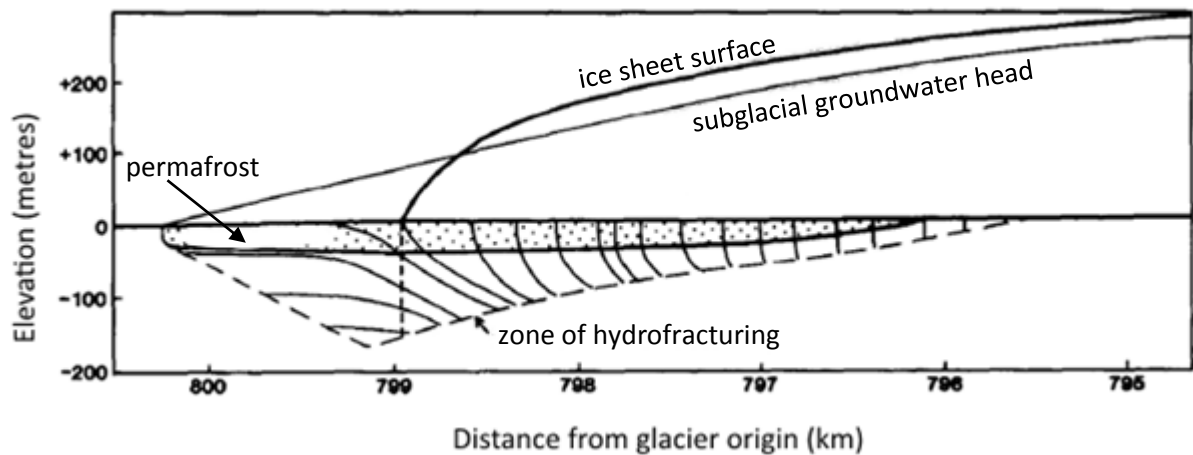


Abb. 7: Verbreitung von Permafrost und Bereich mit möglichen hydromechanischen Rissen (verändert nach BOULTON & CABAN 1995)

Glazigene Rinnen

Durch eine Gletscherüberfahrung wird die Morphologie einer Landschaft nachhaltig verändert. Ein Großteil der erosiven Prozesse findet oberflächennah und somit ohne Beeinträchtigung eines Endlagers in mehreren hundert Metern Tiefe statt. Eine Ausnahme bilden hier allerdings die glazigenen Rinnen, die sowohl aus Elster-, Saale- und Weichelseiszeit bekannt sind (Abb. 8). Auffallend ist dabei der oft parallele Verlauf von Gletscherrinnen und Salzstöcken. In BOETTICHER ET AL. (2011) wird dieses Phänomen damit begründet, dass ein Gletscher die vom Salzaufstieg erhöhten Gebiete umfließt.

Am Ende einer Eiszeit und mit Schmelzen des Gletschers wird die Sedimentfracht vor und im Gletscher in den Rinnen abgelagert. Laut BOETTICHER ET AL. (2011) sind solche Rinnen in Norddeutschland mit Hilfe von 3D-Seismik untersucht worden. Dabei wurde festgestellt, dass in einer Rinne mehrere Generationen von Rinnenbildung und mehrere Ablagerungsprozesse stattfinden können. Es konnten nach BOETTICHER ET AL. (2011) weiterhin Erosionsstrukturen an den Sedimentfüllungen der Tunneltäler festgestellt werden. Es ist also möglich, dass die in der Elsterkaltzeit gebildeten Rinnen auch in den folgenden Eiszeiten für Gletschervorstöße und –rückzüge genutzt und so möglicherweise vertieft wurden. Die Auswirkungen können am Hutgestein mehrerer Salzstöcke Norddeutschlands beobachtet werden, unter anderem auch am Salzstock Gorleben (BOETTICHER ET AL. 2011). Auch das ist im Verlauf zukünftiger Eiszeiten nicht auszuschließen und sollte bei der Überlegung zur Teufe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs berücksichtigt werden.

Wie in MRUGALLA (2011) beschrieben, kann ein Gletschervorstoß im Lockergestein Erosionstiefen von 100-200 m erreichen, lokal sind während der Elsterkaltzeit aber auch Gletscherrinnen mit über 500 m Tiefe entstanden. Im überlagernden Festgestein (v. a. Muschelkalk und Kreidekalke) betragen die Erosionstiefen möglicherweise bis zu 30-50 m.

Hierbei soll allerdings angemerkt werden, dass das Erosionsvermögen eines Gletschers stark variabel sein kann. Dies hängt zum einen von der Art des Gletschers ab. Nach BAHLBURG & BREITKREUZ (2004) gibt es Gletscher, die bis zur Gletscherbasis gefroren sind. Der Untergrund über den sich der Gletscher bewegt, ist ebenfalls gefroren. Im Gegensatz dazu gibt es laut BAHLBURG & BREITKREUZ (2004) Gletscher, die an ihrer Basis eine Temperatur um den Schmelzpunkt aufweisen und so auf einem Wasserfilm gleiten können. Die erosive Wirkung eines solchen „warmen“ Gletschers ist geringer. Zum anderen ist die Abtragungsrate eines Gletschers abhängig von der transportierten Gesteinsfracht, der Art des unterlagernden Gesteins sowie von der Dauer des Vorstoßes an einem Standort.

Bei der Entscheidung über die Mindesttiefe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten diese Ergebnisse berücksichtigt werden, ebenso wie die Möglichkeit, dass die Abtragung auch Grundwassergeringleiter oder -stauer betreffen könnte (BOETTICHER ET AL. 2011). Allgemeingültige Erklärungen für die Rinnenausbildung und –genese sind laut MRUGALLA (2011) nicht bekannt. Nach BOETTICHER ET AL. (2011) wird die Entstehung glazigener Rinnen mit eisrandnahen Schmelzwässern erklärt, welche unter hohem Druck stehen und so innerhalb ihrer Fließzeit eine hohe Erosionstiefe erreichen. Eine andere Hypothese erklärt die hohe Erosionsleistung durch die Eisüberfahung und die damit verbundene Exaration (BOETTICHER ET AL. 2011).

Am Beispiel der Gorlebener Rinne wurde das quartäre Maximum vermutlich während der Elster-Eiszeit erreicht und hat mit einer Ausdehnung von 7,5 km² das Hutgestein freigelegt. Heute besitzt die Rinne in einer Tiefe von 100 m u. NN eine Breite von maximal 4 km und ist bis ca. 300 m u. NN in das umgebende Gestein eingeschnitten (MRUGALLA 2011). Laut KELLER (2009) ist die Gorlebener Rinne allerdings nur unwesentlich tiefer als der umgebende Salzspiegel in das Salzgestein eingeschnitten. Die Mohs'sche Härte von NaCl beträgt 2,5, die von Gips 2,0. Die Erosionswirkung des Gletschers ist im Salz geringer, als vergleichsweise in den überlagernden unkonsolidierten Quartär- und Tertiärschichten und Kreide-Tongesteinen (KELLER 2009).

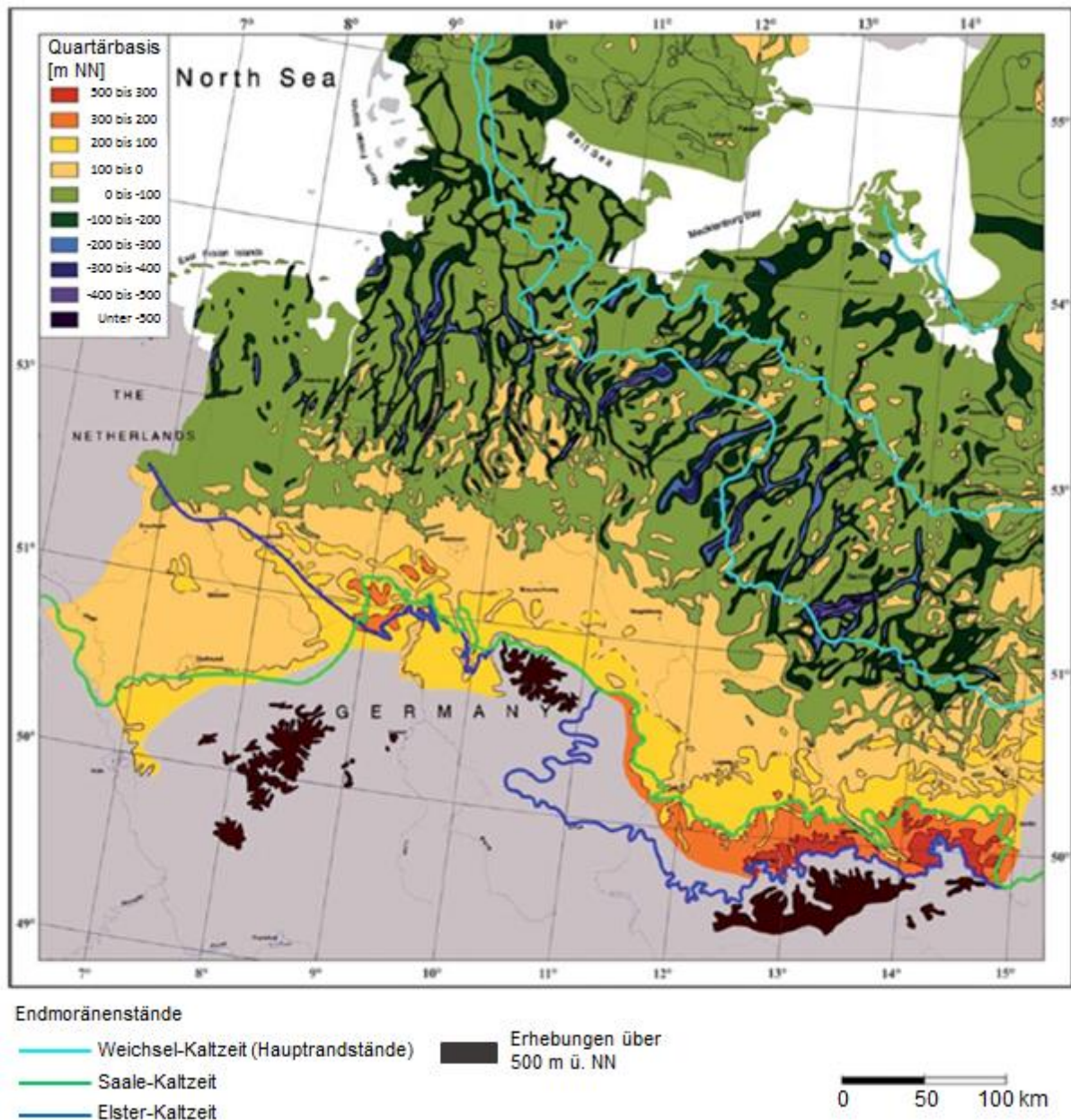


Abb. 8: Quartärbasis, Eisrandstände und Verteilung der glazigenen Rinnen in Norddeutschland (MRUGALLA 2011, nach STACKEBRANDT ET AL. 2001)

Kryogene Klüfte

In einigen Salzstöcken um Hannover (z.B. im Salzstock Bokeloh) wurden vom Salzspiegel ausgehende, möglicherweise kryogene Klüfte bis in 600 bis 700 m u. GOK kartiert, deren Verläufe von der Internstruktur des Salzstocks unabhängig war (BOETTICHER ET AL. 2011). Laut BOETTICHER ET AL. (2011) wurde deshalb für die Entstehung der Klüfte ein Zeitraum nach dem Aufsteigen des Salzstocks angenommen. Eine Theorie zur Entstehung von kryogenen Klüften

ist die Bildung als Folge der Abkühlung während einer Kaltzeit und damit verbunden die Kontraktion des unterlagernden Gesteins (MRUGALLA 2011). Am Standort Gorleben wurden die Schächte mit dem Gefrierverfahren abgeteuft und dabei im Topbereich des Salzstocks Risse beobachtet, welche nicht der natürlich Streichrichtung am Standort (SW-NE) folgen. So wurde beispielsweise in Schacht 2 eine 59 m lange, SE-NW streichende Kluft angetroffen, welche entweder durch kryogene Bildung oder durch das Gefrierverfahren beim Abteufen des Schachtes erklärt werden kann (MRUGALLA 2011). Diese Theorie zeigt, dass durch Temperaturveränderungen im Deckgebirge Risse und Wegsamkeiten im Gestein ebenso wie im Salz entstehen können. Auch BOETTICHER ET AL. (2011) beschreiben, dass durch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten wegen der inhomogenen Zusammensetzung im überlagernden Gestein Spannungen entstehen können, die die mechanische Zugfestigkeit überschreiten. Die kryogenen Klüfte reichen ins Salinar und Hutgesteinsmaterial wird durch eindringendes Wasser aus dem überlagernden Gestein eingetragen (BOETTICHER ET AL. 2011). Weiter zeigten Untersuchungen im sibirischen Permafrost laut BOETTICHER ET AL. (2011), dass durch eine Senkung der Temperatur in gefrorenen Böden Risse und Deformationen durch Schrumpfungsprozesse entstehen. Diese sind sowohl vertikal als auch horizontal ausgebildet und könnten somit ein Analogon zur Bildung kryogener Klüfte darstellen. Auch BAUER (1991) diskutiert das Vorhandensein von Klüften als Folge eines kryogenen Kontraktionsprozesses. Gründe, die für eine kryogene Bildung sprechen, seien nach BAUER (1991) der von der Internstruktur unabhängige Verlauf der Klüfte (postdiapirische Bildung der Klüfte) sowie deren ausschließliches Vorkommen in oberen Salzstockbereichen (maximale Teufe von ca. 600 m unter GOK). Im Salzstock Bokeloh wurden zudem Kluftfüllungen mit mesozoischen und alttertiären Mikroplanton und Mikrosporen gefunden, was für eine daran zeitlich anschließende Kluftbildung spricht (höchstens jungtertiäre Bildung) (BAUER 1991). Nach MRUGALLA (2011) konnte die Bildung kryogener Klüfte während einer Kaltzeit in Modellrechnungen nicht nachgewiesen werden. Allerdings haben Modellrechnungen im Salz, die durch die BGR im Jahr 1990 durchgeführt wurden, eine Auswirkung thermisch induzierter Zugspannungen in mehr als 100 m Teufe gezeigt; das Modell ist aber stark vereinfacht, stellt also nur qualitativ die Möglichkeit eines solchen Prozesses dar (BOETTICHER ET AL. 2011).

Die genauen Bildungsbedingungen dieser Klüfte sind also nicht geklärt, und somit ist auch die Prognose für die nächsten Million Jahre sehr unsicher. Auch eine Arbeitsgruppe um HAMMER ET AL. (2012) hat sich mit der möglichen Entstehung beschäftigt. Es folgt eine Zusammenfassung dieses Arbeitspapiers: Im Falle eines Gletscherrückzugs wäre durch die Entlastung und die abnehmende Spannung eine Rissbildung bzw. eine Reaktivierung bereits bestehender und verheilter Risse möglich. Auch basale Schmelzwässer, welche unter hohem

Druck stehen und in bestehende Klüfte eingepresst werden, können eine Kluftausdehnung durch hydraulisches Fracken verursachen. Demnach müssten laut HAMMER ET AL. (2012) bei der weiteren Erforschung der kryogenen Klüfte auch die hydraulischen Verhältnisse während einer Gletscherüberdeckung betrachtet werden; denn die Schmelzwässer an der Gletscherbasis oder im Vorfeld des Gletschers könnten durch die erhöhten Drücke, kombiniert mit tektonischen Bewegungen oder der Entlastung bei Rückzug des Gletschers Risse reaktivieren und Wegsamkeiten schaffen. Die Abkühlung durch den Permafrost würde laut HAMMER ET AL. (2012) nicht bis zum Salzspiegel reichen. Auch eine Modellrechnung zur Abkühlungsrate während des glazigenen Maximums zeigt keine Temperaturgradienten im Bereich der Salztöps, welche eine Rissbildung zur Folge haben könnten (HAMMER ET AL. 2012). So sollen beispielsweise die Klüfte im Salzstock Bokeloh demnach das Resultat aus zwei Störungszonen sein, die sich im Bereich des Salzstocks kreuzen und deren Versatz bis zum Sockel des Salinars reicht. Der Nachweis hierfür sei aber nach HAMMER ET AL. (2012) schwierig.

Im Folgenden sollen die vorgestellten Entstehungstheorien noch einmal kurz dargestellt werden.

- BOETTICHER ET AL. (2011): Die Entstehung von Rissen durch Abkühlungsprozesse während Kaltzeiten ist möglich, allerdings existiert auch die Möglichkeit einer fluidinduzierten Öffnung durch die im Deckgebirge wirkenden Porenwasserdrücke. Die Möglichkeit der Beschädigung des ewG durch derart tiefreichende Klüfte ist unwahrscheinlich.
- BAUER (1991): Verlauf der Klüfte, Kluftfüllung sowie deren Beschränkung bis ca. 600 m Teufe unter GOK spricht für eine Bildung der Klüfte durch kryogene Kontraktion
- MRUGALLA (2011): Es existieren Hinweise für die kryogene Kluftbildung, aber keine Beweise. Klüfte im Salzstock Gorleben könnten auch durch das Gefrierbohrverfahren ausgelöst worden sein. Allgemein sind Klufttiefen bis 600 m u. NN, wie im Salzstock Bokeloh, nicht für den Salzstock Gorleben zu erwarten. Besonderheit des Salzstocks Bokeloh ist die geringe Tiefe des Salzspiegels und somit auch die tieferreichende Abkühlung während einer Kaltzeit.
- HAMMER ET AL. (2012): Die Möglichkeit einer kryogenen Bildung von Klüften durch Abkühlungsprozesse wird sehr strikt verneint. Wahrscheinlicher scheint die Entstehung im Salzstock Bokeloh durch kreuzende, tiefreichende tektonische Störungszonen. Möglich wäre auch eine fluidinduzierte Öffnung oder Reaktivierung bestehender oder verheilter Risse durch Schmelzwasser unter oder vor dem Gletscher.

Änderung der mechanisch-hydraulischen Integrität durch Eisauflast

Der Einfluss einer Gletscherauflast für ein Endlager ist schwer abzuschätzen, da die Auswirkungen nicht kontinuierlich, sondern sehr komplex sind und sich im zeitlichen Verlauf mehrmals ändern (BOETTICHER ET AL. 2011). Wie in MRUGALLA (2011) beschrieben, konnten in den überlagernden Schichten des Salzstocks Gölle glazigene Deformationen nachgewiesen werden, die bis in Tiefen von 120-150 m u. GOK reichen. Zu glazigenen Deformationen gehören Schichtverstellungen und Lagerungsstörungen, der Salzstock selbst wurde dabei aber nicht erreicht. Grundsätzlich können Störungen, vor allem solche, die durch den Salzaufstieg gebildet wurden, durchaus eine Verbindung zwischen Grundwasserleiter und Salzstock darstellen. Eine Gletscherauflast kann laut BOETTICHER ET AL. 2011 in einem solchen Fall stabilisierend wirken und eine entstehende Seismizität unterdrücken. BOETTICHER ET AL. (2011) erklären weiter, dass die Auflast durch einen Gletscher alleine lediglich zu einer Erhöhung der Kompression führt, die dem Grundspannungszustand entspricht, was die Barrierenwirkung nicht gefährdet. Allerdings können sich in Kombination mit anderen Einflüssen wie hydromechanischem Druck oder Scherdeformation Spannungszustände entwickeln, die wiederum Risse und Wegsamkeiten entstehen lassen.

BOETTICHER ET AL. (2011) stellen weiterhin fest, dass sich das Spannungsregime durch Entlastung bei Gletscherrückzug ändern kann und nicht mehr wie ursprünglich isotrop, sondern unter Umständen rotiert ist. Dieses neue Spannungsfeld begünstigt das Entstehen oder die Vergrößerung von horizontal gerichteten Rissen, wie in Abb. 9 verdeutlicht. Die Auswirkungen werden von BOETTICHER ET AL. (2011) zwar als gering eingeschätzt, jedoch sollte die daraus resultierende mögliche Permeabilitätsänderung bedacht werden.

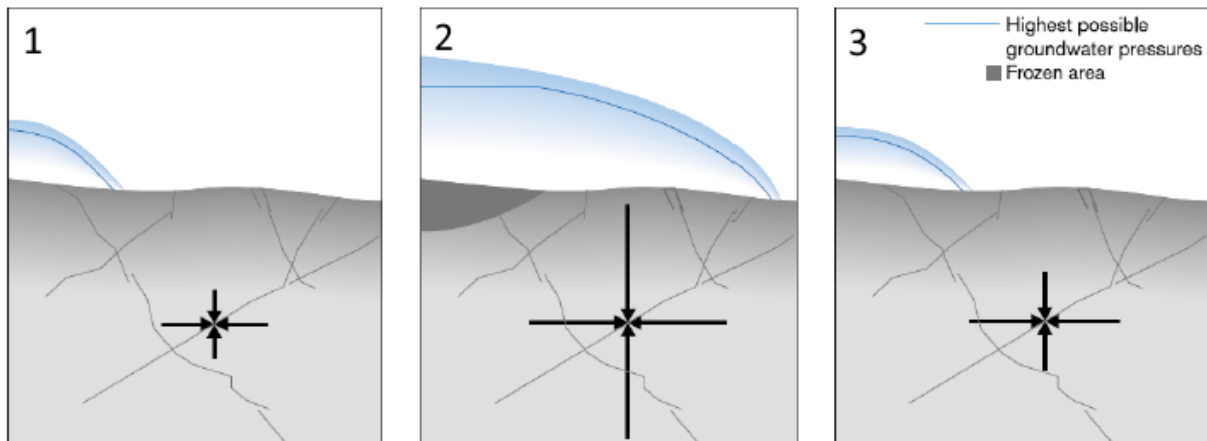


Abb. 9: Bild 1 zeigt die Spannungsverteilung vor der Gletscherüberdeckung. Die horizontale Spannungskomponente dominiert. Bild 2 verdeutlicht, dass die vertikale Spannung bei Eisüberdeckung verstärkt wird. Bild 3 zeigt die Situation nach Gletscherrückzug. Die vertikale Spannungskomponente nimmt schneller ab als die horizontale Spannung, was die Bildung von horizontalen oder annähernd horizontalen Rissen begünstigt (verändert nach BOULTON ET AL. 2001)

Außerdem ist die Unterscheidung von statischen Deformationen und dynamischen, schnell wirkenden Veränderungen zu treffen. Erstere werden z.B. durch klimatische oder geologische Entwicklungen (Gletscherauflast, Hebung- und Senkung von Regionen etc.) ausgelöst und können von plastisch verformbaren Gesteinen wie Salz ausgeglichen werden. Dynamische Veränderungen führen zum Bruch des Gesteins und somit zu möglichen Wegsamkeiten (BOETTICHER ET AL. 2011). Da sich weitere Kaltzeiten mit Eisüberfahrungen in Norddeutschland ereignen werden, sind auch glazigene Deformationen als sicher eintretende Ereignisse anzunehmen. Deren Ausprägung und Tiefenwirkung wird ähnlich sein wie die bereits beobachteten Deformationen (MRUGALLA 2011). Zum Nachweis des sicheren Einschlusses für einen Zeitraum von einer Million Jahre ist es notwendig das Schädigungspotential beider Vorgänge zu beschreiben.

Bewertung eines Endlagers ausgehend von der Möglichkeit einer Kaltzeit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass nicht alle Auswirkungen von Kaltzeiten im Detail erforscht und nicht alle Begleiterscheinungen eindeutig erklärbar sind. Die größten Gefahren für ein Endlager in einem Salzstock sind wohl die glazigenen Rinnen mit einer Tiefe von 500 m

und mehr, die möglicherweise in folgenden Kaltzeiten als Gletscherrinnen reaktiviert und eventuell vertieft werden können. Bei einer Gletscherüberfahung muss aber auf jeden Fall von einer Abtragung des Lockergesteins bis in eine Tiefe von 200 m gerechnet werden. Am Beispiel des Salzstocks Gorleben beträgt die Rinnentiefe 300 m u. NN (MRUGALLA 2011). Der Salzstock wurde dabei oberflächlich freigelegt.

Nicht im Detail geklärt sind die Entstehung und mögliche Ausprägung von Klüften während einer Kaltzeit oder deren Herkunft im Salzstock. Deshalb sollten Vorgänge zur Bildung von Wegsamkeiten im Zusammenhang mit Kaltzeiten weiter erforscht werden, um zu klären ob und wie diese Klüfte den ewG gefährden können.

Darüber hinaus sollte die Möglichkeit der verstärkten Subrosion am Gipshut und eventuell an den Salzstockflanken durch veränderte Grundwasserbewegung in Folge von Permafrostüberdeckung bedacht werden. Toneinschlaltungen können die Grundwasserbewegung in die Tiefe begrenzen. In welcher Geschwindigkeit die Subrosion an den Salzstockflanken bei konstantem Grundwasserzufluss voranschreitet, sollte noch weiter untersucht werden. In der Literatur sind Subrosionsraten vor allem am Gipshut bekannt (z.B. GERARDI & WILDENBORG 1999).

Daraus ergeben sich in Hinblick auf die Auswirkungen von Kaltzeiten folgende Anforderungen an einen möglichen Standort:

Während einer Kaltzeit muss mit verschiedenen Vorgängen gerechnet werden. Der Sachverhalt der vollständigen Inlandvereisung v. a. in Kombination mit schon vorhandenen glazigenen Rinnen ist derjenige, der die größte Gefahr zur Schädigung des ewG darstellt. Für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren muss mit mehreren Eiszeiten gerechnet werden. Dabei darf es in keinem Fall zur Freilegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs kommen, was an den lokalen Gegebenheiten jedoch abzuleiten ist. Die Mächtigkeit der Gesteinsüberdeckung kann die Freilegung verhindern. Festgestein ist in diesem Fall wesentlich beständiger als Lockermaterial und stellt somit eine bessere Schutzbarriere dar. So gilt: die Mächtigkeit der Überdeckung bestimmt die Eignung eines Standortes und es kann somit eine entsprechende Mindestanforderung definiert werden. Dabei ist festzustellen, dass eine mächtigere Überdeckung auch mehr Schutz darstellt. Dies kann als Abwägungskriterium genannt werden.

3.1.2 Bewertung eines Endlagerstandortes in Salzstöcke und -kissen der off-shore Regionen Deutschlands

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe hat 2008 eine Übersichtskarte über die Salzstrukturen Norddeutschlands veröffentlicht (REINHOLD ET AL. 2008). Vereinzelt sind darin auch Salzkissen in der Nord- und der Ostsee verzeichnet, ebenso wie Salzstöcke, die vom Festland bis in die Nordsee reichen.

Die Erfahrungen in Deutschland für Bergbau in off-shore Regionen beziehen sich laut Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG 2014) auf die Förderung von Erdöl und Erdgas durch Bohrinseln, den Bau und Betrieb von Transitleitungen und der Gewinnung von Rohstoffen wie Sand und Kies. Allerdings existieren bisher weltweit noch keine Projekte in off-shore Gebieten, die vergleichbar mit Untertagebergbau an Land wären, d.h. es fehlen auch jegliche Erfahrungen. Der Zeitaufwand für Exploration bis zu hin zu Entwicklung und Planung eines solchen Endlagers würde ein vergleichbares Projekt an Land weit übersteigen. Die Sicherheit eines Endlagers in off-shore Bereichen ist in Hinblick auf Zeiträume von einer Million Jahre nicht darstellbar.

Außerdem muss der Ausbau der Infrastruktur zur Beförderung von Arbeitskräften, Material, Maschinen und schließlich auch den radioaktiven Abfallbehältern berücksichtigt werden. Zudem müsste die Regelung für die Endlagerung in Salzstöcken oder -kissen außerhalb des zu Deutschland gehörenden Küstenmeeres (12 Seemeilen-Zone, entspricht 22,22 km) geklärt werden. Daran anschließend bis 200 Seemeilen jenseits des Küstengebietes liegt die AWZ, die „deutsche ausschließliche Wirtschaftszone“, welche nicht zum deutschen Hoheitsgebiet gehört. Allerdings stehen dem jeweiligen Küstenstaat in einer AWZ „Rechte zum Zweck der Erforschung und Ausbeutung, Erhaltung und Bewirtschaftung der lebenden und nichtlebenden natürlichen Ressourcen der Gewässer über dem Meeresboden, des Meeresbodens und seines Untergrunds sowie hinsichtlich anderer Tätigkeiten zur wirtschaftlichen Erforschung und Ausbeutung der AWZ wie der Energienutzung aus Wasser, Strömung und Wind zu“ (NOLTE 2010). Der AWZ in der Nordsee unterliegt einer strengen Raumordnung, da sich hier verschiedene Interessen, wie die Schifffahrt, der Bau von Windparks und untermeerischer Daten- und Rohrleitungen, die Fischerei, Forschung und auch Projekte zum Umweltschutz, überschneiden (NOLTE 2010). Durch Forschungshandlungen im Bereich des Festlandsockels darf laut Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH 2014) „keine Verunreinigung des Meeres entstehen und die Sicherheit der Bundesrepublik Deutschland nicht gefährdet werden“.

Die Auswahl eines Standortes, der sich off-shore befindet, kann in Hinblick auf den derzeitigen Stand der Technik ausgeschlossen werden.

3.1.3 Rohstoffsituation Norddeutschlands und Gebiete mit besonderer Eignung für die Geothermie oder als Kavernenspeicher

Rohstoffsituation Norddeutschlands

Bei der Planung eines Endlagers muss die Rohstoffsituation betrachtet werden und das nicht nur, weil es durch die Förderung bestimmter Rohstoffe zur Störung eines Endlagerprojektes kommen kann. Auch nach Verschluss eines Endlagers besteht theoretisch die Gefahr, dass ein Teil des betreffenden Gesteinsvolumens unabsichtlich bei der Suche nach einem Rohstoff beschädigt oder durchteuft wird. Deshalb sollte vorab bereits bekannt sein, welche Rohstoffe im Moment gefördert werden und welche vielleicht in Zukunft einer Verknappung und somit einer deutlichen Steigerung deren wirtschaftlichen Wertes unterliegen könnten. Natürlich kann aus heutiger Sicht keine genaue Aussage darüber getroffen werden, welche Elemente oder chemischen Verbindungen eventuell durch zukünftige Technologien an Bedeutung gewinnen werden. Aus diesem Grund beschränkt sich die Einschätzung zur Rohstoffsituation in diesem Kapitel auf bekannte und in heutiger Zeit wichtige Rohstoffe.

Laut HUY (2013) wurden 2012 knapp 200 Mio. t Braunkohle, Steinkohle und Erdöl, ungefähr 12 Mrd. m³ Erdgas und Erdöl und circa 560 Mio. t mineralische Rohstoffe produziert.



Energierohstoffe

	✱ Braunkohle
	⊠ Steinkohle
	⛢ Erdöl ⛢ Erdgas
	● Ölschiefer
	Torf

Steine und Erden

Sedimentgesteine

	Kies und Sand
	● Ton und Tonstein
	● Kalk- und Dolomitstein
	● Gips- und Anhydritstein
	● Sandstein und Grauwacke

Abb. 10: Rohstoffkarte Norddeutschlands (verändert nach HUY 2013)

Der wichtigste mineralische Rohstoff sind hierbei die Kiese und Sande mit 235 Mio. t, welche bevorzugt in Norddeutschland abgebaut werden (Abb. 10) und zusammen mit Natursteinen über die Hälfte der nationalen Rohstoffproduktion darstellen (HUY 2013). Daran schließt sich die Braunkohleförderung an, wobei Braunkohle noch der bedeutendste nationale Energieträger ist und die deutsche Braunkohleförderung 2012 weltweit die größte war (HUY

2013). Des Weiteren ist die Förderung von Erdöl und Erdgas, abgesehen von den marinen Lagerstätten, in Norddeutschland zentriert. Laut HUY (2013) befinden sich 94 % der deutschen Erdgasfelder in Niedersachsen. Deutschland war 2012 außerdem für Kaolin, welches zur Gruppe der Ton und Tonsteine gehört, der weltweit zweitgrößte Produzent (HUY 2013). In Norddeutschland gibt es hier allerdings nur kleinere Abbaue, welche aufgrund ihrer Größe wohl nur untergeordnet eine Rolle spielen. Des Weiteren konzentriert sich die Salzproduktion sowohl im Bereich der Kalisalze für die Herstellung von Düngemitteln als auch des Steinsalzes auf den Norden Deutschlands. Bei der Förderung von Kalisalz ist Deutschland weltweit fünftgrößter Produzent und in der Europäischen Union führend (HUY 2013). Darüber hinaus von Bedeutung sind Kupferschiefervorkommen. Laut MINERALIENATLAS (2016) waren bedeutende Vorkommen in Mittel-Deutschland (z.B. Mansfelder Mulde und Sangershausen), in der Oberlausitz und in Brandenburg verteilt; darüber hinaus sind in Polen noch drei Bergwerke aktiv. In der Lausitz wurden derzeit wieder Explorationsvorhaben aufgenommen, um die vorhandenen Erzvorkommen neu zu bewerten und eventuell wieder abzubauen (MINERALIENATLAS 2016).

Gebiete mit besonderer Eignung für die Geothermie

Nach HOTH ET AL. (1997) liegen die durchschnittlichen Temperaturen in 1 km Tiefe in Norddeutschland bei 45-50 °C, wobei die Temperaturen im Norddeutschen Becken von den beckenzentralen Bereichen hin zur Osteuropäischen Tafel abnehmen (Abb. 11). Die höchsten Temperaturen im Niedersächsischen Becken in 1 km Tiefe liegen bei 60 °C, welche aber stark lokal begrenzt sind (HOTH ET AL. 1997). Die Ursachen für die ungewöhnlich hohen Temperaturen sind bisher nicht geklärt. Sie werden in HOTH ET AL. (1997) durch unterschiedlichen Krustenaufbau, störungsgebundenem Wärmetransport und den häufig im niedersächsischen Becken vorkommenden Salzstrukturen erklärt. Nach ENERCHANGE GBR (2011) sind die Temperaturen oberhalb von Salzstrukturen etwa 10-15 °C, maximal aber 24 °C höher, als in ähnlichen Tiefen ohne Salz.

Laut GRISSEMANN & CZORA (2003) wird das natürliche geothermische Feld durch den terrestrischen Wärmestrom und von den Wärmeleitfähigkeiten und Lagerungsverhältnisse der geologischen Einheiten beeinflusst. Die Leitfähigkeit von Salzgestein ist dabei in etwa doppelt so hoch wie die der umgebenden Gesteine. Laut ENERCHANGE GBR (2011) macht die erhöhte Leitfähigkeit und die geringe Tiefe der Salzstrukturen diese so interessant für die geothermische Nutzung. Die stark erhöhte Leitfähigkeit von Salz führt zum so genannten

„Kamineffekt“. In gleicher Teufenlage ist die Temperatur im Salzstock erhöht im Vergleich zum umgebenden Gestein.

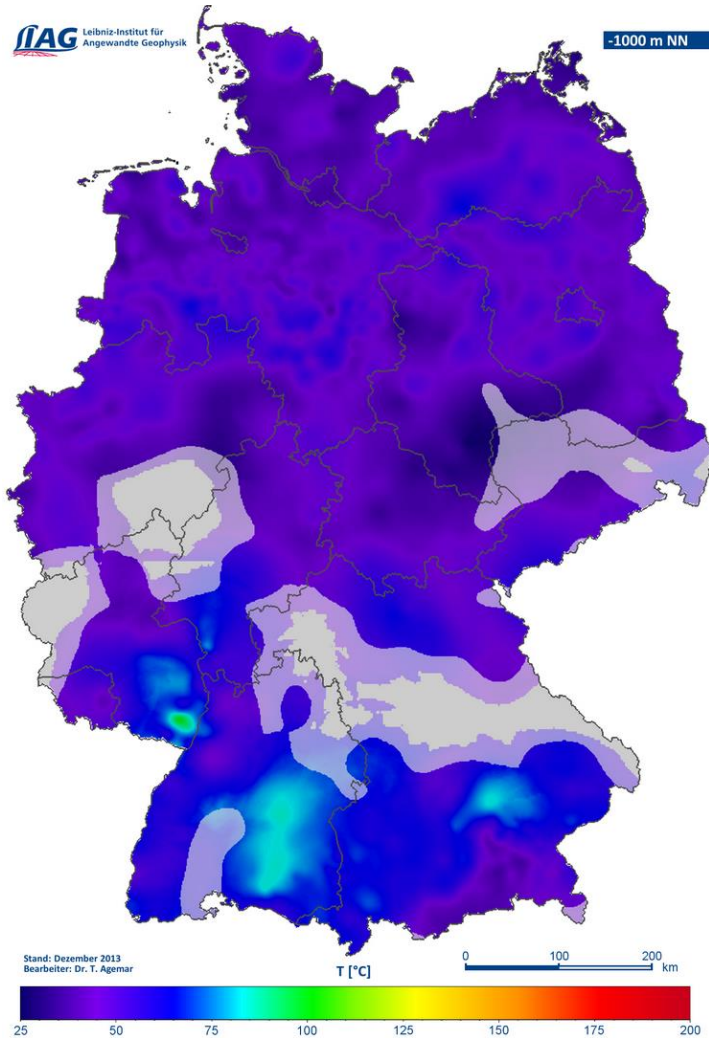


Abb. 11: Temperaturkarte Deutschlands in 1000 m u. NN (LIAG 2008)

Im Salzstock Gorleben wurde die Temperatur im Tiefenniveau der Erkundungssohle (840 m unter GOK) nach einem Modell des Salzstocks von DELISLE (1980) auf 38 °C geschätzt (GRISSEMANN & CZORA 2003). Geht man von der weit verbreiteten, aber unwissenschaftlichen Annahme aus, dass die geothermischen Tiefenstufe 3 °C pro 100 m beträgt, ist dieser Wert im Vergleich dazu um circa 4 °C erhöht (ausgehend von einer Oberflächentemperatur von 9 °C). Der Wärmestrom im Bereich des Salzstocks hat laut GRISSEMANN & CZORA 2003 einen Wert von 110-120 mW/m² im Gegensatz zum regionalen Durchschnittswert von 50-60 mW/m², was eine Erhöhung um mehr als 80 % bedeutet. Nach Modellrechnungen von DELISLE (1980)

ist im zentralen Bereich des Salzstocks Gorleben ein Wärmestrom von ca. 120 mW/m^2 zu erwarten im Gegensatz zu regionalen Durchschnittswerten von $50\text{-}60 \text{ mW/m}^2$, wobei das Temperaturfeld zusätzlich durch Wärme transportierende Grundwasserströmungen im Deckgebirge beeinflusst werden kann.

Diese Werte entsprechen einer allgemein beobachteten Erhöhung im Bereich von Salzstöcken.

Gebiete mit besonderer Eignung als Speichermedium

Die nachfolgende Einschätzung stammt aus ZANDER-SCHIEBENHÖFER ET AL. (2014). Ein Großteil des in Deutschland genutzten Erdgases wird demnach aus dem Ausland importiert. Die Lieferrate ist hierbei einigermaßen stabil, der Verbrauch aber saisonal unterschiedlich. Deshalb wird in Deutschland Erdgas vor allem in Salzkavernen gespeichert, vor allem um Spitzenlasten schnell ausgleichen zu können. Im Moment befinden sich weitere Erdgasspeicher in Planung, welche die Speicherkapazität um weitere 30 % steigern sollen.

Darüber hinaus soll nach ZANDER-SCHIEBENHÖFER ET AL. (2014) im Zuge der Energiewende die fluktuierende Einspeisung von Wind- oder Solarstrom durch Druckluft-, Wasserstoff-, und Pumpspeicherkraftwerke ausgeglichen werden. Zurzeit kann weniger als eine Stunde der Last des gesamten Stromnetzes in Deutschland mittels Pumpspeicherkraftwerken gespeichert werden. Der Bedarf an Energiespeichern, welche eine durchgängige Versorgung gewährleisten können, wird in Zukunft steigen. Kurzfristige Schwankungen durch die unsteten Einspeisungen der regenerativen Energieerzeuger können hierbei sehr gut durch Druckluftspeicherkraftwerke ausgeglichen werden. Für einen längerfristigen Ausgleich können Wasserstoffspeichersysteme, welche im Falle überschüssiger Stromproduktion Wasserstoff erzeugen und für weitere Anwendungen zur Verfügung stellen können, verwendet werden. Da Salzkavernen schon seit Jahrzehnten zur Erdgasspeicherung erfolgreich genutzt werden, sollen auch Druckluft und Wasserstoff in Kombination mit Speicherkraftwerken in Salzkavernen eingebracht werden.

Bewertung eines Endlagers im Norddeutschen Becken

Der Temperaturgradient in Deutschland kann sich lokal unterscheiden. Laut HOTH ET AL. (1997) ist es wahrscheinlich, dass die Temperaturen im Untergrund durch die Salzstöcke und

Salzkissen im Norddeutschen Becken aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Salz erhöht sind.

Daraus ergeben sich zwei Überlegungen für die Endlagerplanung: Zum einen stellt das Norddeutsche Becken eine Zielregion für zukünftige Geothermie-Projekte dar. Auch sollen vermutlich Erdgas, Druckluft und Wasserstoff in Salzkavernen gespeichert werden. Allerdings benötigt jedes der oben genannten Vorhaben wie auch die Planung eines Endlagers lange Vorlaufzeiten, weshalb eine direkte Konkurrenz nicht zu erwarten ist. In Norddeutschland existieren einige Regionen, welche für die regenerative Energiegewinnung durch Erdwärme geeignet sind. Ebenso ist die Anzahl der Salzstöcke, welche als Kavernenspeicher ausgebaut und genutzt werden können, vergleichsweise hoch. Deshalb sollte keine Region im Norddeutschen Becken von vornherein als Endlagerstandort wegen möglicher Konkurrenz mit einem der oben genannten Projekte ausgeschlossen werden.

Die Steine und Erden als größter Anteil der deutschen Rohstoffförderung sind in weiten Bereichen Deutschlands vorhanden. Die Planung eines Endlagers unter einem bereits bestehenden Tagebau kann mit Schwierigkeiten verbunden sein, wenn keine ausreichende Mächtigkeit überlagernder Gesteinsschichten vorhanden wäre, denn die mögliche Anzahl an Eiszeiten mit Gletscherbildung darf nicht zu einer Freilegung oder Schädigung des ewG führen. Darüber hinaus können verschiedene Untersuchungsmethoden, wie zum Beispiel seismische Untersuchungen, durch die übertägigen Arbeiten in einem Abbau stark negativ beeinflusst oder unmöglich gemacht werden. Abgesehen davon bieten möglichst unbeeinflusste und ungestörte Gesteinseinheiten einen besseren Einschluss der Abfälle. Standorte mit tiefreichenden Tagebauen würden somit im Vergleich zu anderen Standorten einen Nachteil aufweisen.

Des Weiteren sind im norddeutschen Raum eine Vielzahl von Salzstöcken und -kissen vorhanden, sodass auch hier kein Ausschluss eines geplanten Endlagerbergwerks wegen möglicher Konkurrenz zu einem möglichen späteren Salzbergwerk stattfinden sollte. Allerdings ist von der Einlagerung radioaktiver Abfälle in ein bestehendes und stillgelegtes Salzgewinnungsbergwerk abzuraten, wenn keine ausreichenden Schutzzonen um die vorhandenen Hohlräume bzw. nicht mehr ausreichendes Volumen des Salzkerns zur Realisierung eines Endlagers vorhanden sind. Für ein Endlagerbergwerk in einer Salzstruktur wird von Beginn an der optimale Einschluss der Abfälle für einen möglichst langen Zeitraum angestrebt. Dementsprechend werden nur so viele Hohlräume (Strecken, Schächte, Kammern etc.) aufgeföhren, wie für den sicheren Einschluss notwendig sind. Jeder weitere Hohlraum

wird vermieden. Die Zielsetzung und Sicherheitskriterien sind bei beiden Einrichtungen also sehr unterschiedlich.

Bei der Förderung von Erdöl und in weit größerem Anteil von Erdgas, z.B. in Niedersachsen, ist ein Interessenskonflikt nicht auszuschließen. Laut HUY (2013) hat die Förderung von Rohgas 2012 um 9,1 % im Gegensatz zum Jahr 2011 abgenommen. Die Abnahme der Produktion liegt nach HUY (2013) vor allem an zunehmender Verwässerung und Erschöpfung der in der Förderung befindlichen Lagerstätten. Neue wirtschaftlich interessante Lagerstätten wurden in den letzten Jahren nicht entdeckt. Die Erdöl- und Kondensatförderung lag 2012 um 2,0 % unter dem Wert des Vorjahres. Gleichzeitig stiegen die Rohölimporte 2012 im Vergleich zum Vorjahr um 3,2 % (HUY 2013). Daraus ist deutlich zu erkennen, dass die Nachfrage nach neuen Lagerstätten enorm ist. Hinzu kommt die Tatsache, dass sich die Kondensatlagerstätten in Norddeutschland häufig an Salzstöcken befinden, da diese eine natürliche, undurchlässige Falle für die flüchtigen Kondensate darstellen. Daher ist hier ein möglicher Interessenskonflikt zwischen der Auffahrung eines Endlagerbergwerks und einer Erdgasbohrung durchaus nicht auszuschließen. Die Ausweisung und Festlegung von Schutzzonen um Bohrungen und vorhandenen Hohlräumen ist also auch hier unerlässlich.

3.1.4 Hydrogeologie in Norddeutschland am Beispiel des Salzstocks Gorleben

Aquifergliederung im Deckgebirge

KLINGE ET AL. haben 2007 die Hydrogeologie in den überlagernden Gesteinsschichten über dem Salzstock Gorleben untersucht. Die nachfolgenden Ausführungen stammen, soweit nicht anders beschrieben, aus diesem Bericht.

Im Deckgebirge wurden bei Bohrungen über und um den Salzstock zwei dominierende Grundwasserleiter charakterisiert (Abb. 12). Die vorwiegend tonigen Sedimente des Rupeltons (tolu, Unteroligozän, in Abb. 12 tol-tpa) entsprechen der Basis des regionalen Grundwassersystems und grenzen dieses somit von den tieferliegenden Grundwasserleitern ab. Der untere Grundwasserleiter entspricht in Abb. 12 der Abkürzung tmiBS1, das die sandig, schluffigen Sedimente der Unteren Braunkohlensande (Untermiozän) und des Neochatt (Oberoligozän) bezeichnet. Überlagert werden die wasserführenden Schichten vom tonig-schluffigen Hamburg-Ton tmiHT (Untermiozän), der den unteren vom oberen Grundwasserleiter abgrenzt. Der obere Grundwasserleiter wird von quartären Sedimenten (dominiert von Schmelzwassersanden, Geschiebemergeln und Tonen, Schluffen und

Feinsanden als Ablagerungen im entstandenen Becken) überdeckt. Der obere Grundwasserleiter ist inhomogen aufgebaut und besteht vorwiegend aus einem Wechsel von saale- und weichseleiszeitlichen Sedimenten (qs, qN). Der sandige Anteil an der Formation überwiegt allerdings, sodass eine Grundwasserbewegung möglich ist.

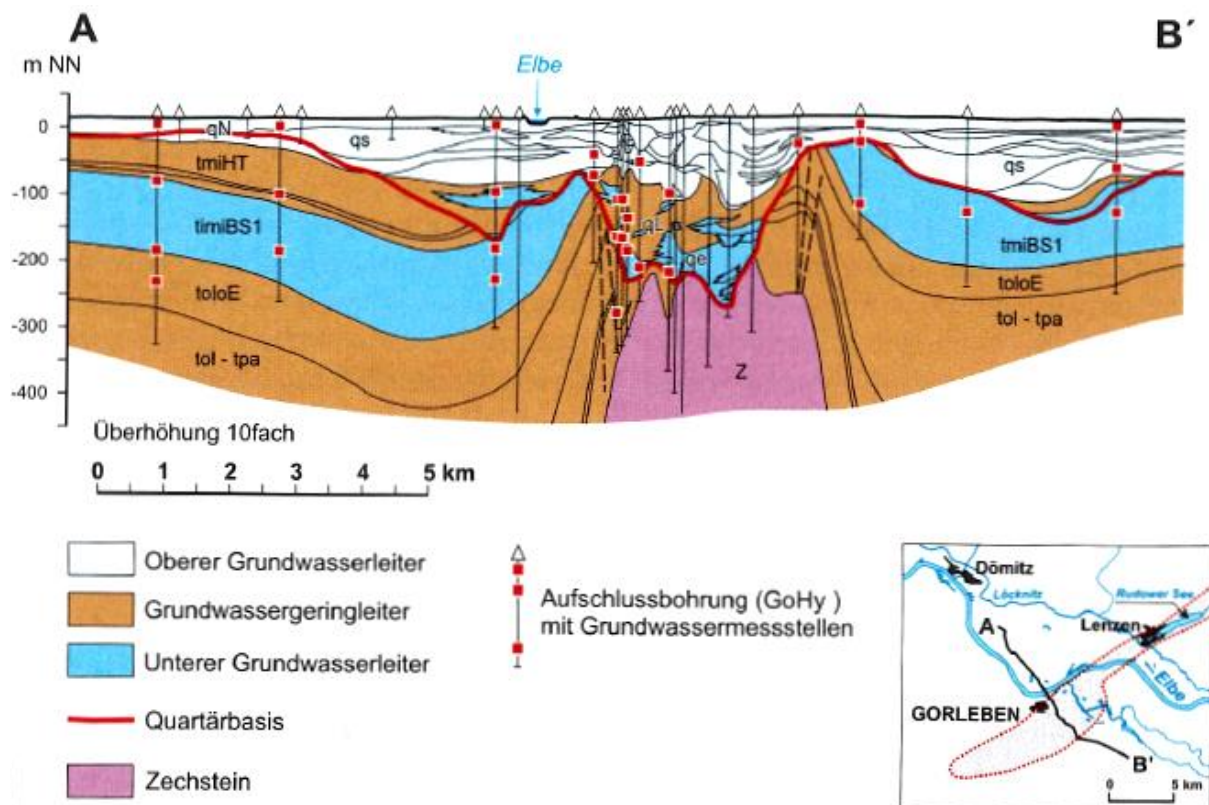


Abb. 12: Darstellung der dominierenden Grundwasserleiter in den überlagernden Schichten des Salzstocks Gorleben (KLINGE ET AL. 2007)

In der Gorlebener Rinne wurden die gering durchlässigen tertiären Tongesteine, die sich im Beckentiefsten befunden und den Salzstock vermutlich komplett bedeckt haben, in einer Länge von 5,0 km sowie einer Breite von 1,0 km bis 1,5 km erodiert. Schmelzwassersande aus der Elsterkaltzeit überdecken hier direkt das Hutgestein und zum Teil das Salinar. Die Rinnensande werden vom vorwiegend gering durchlässigen Lauenburger-Ton-Komplex überlagert, der den Kontakt zwischen unterem und oberem Grundwasserleiter verhindert. Allerdings zeigen Pumpversuche Durchlässigkeiten, welche zum Teil durch die tektonische Störung des Komplexes durch die Eiszeiten erklärt werden können. Auch MRUGALLA (2011) beschreibt die überlagernden Schichten des Salzstocks Gorleben als glazigen deformiert mit Verstellungen und Schuppenbau. Weiter erklärt MRUGALLA (2011), dass Störungen im

Deckgebirge eines Salzstocks, z.B. durch Subrosion oder durch Aufsteigen des Salzes, die hydrogeologischen Verhältnisse beeinflussen können. So können Wegsamkeiten entstehen, ehemals getrennte Aquifere miteinander verbunden werden oder ein Aquifer durch Verschieben der ehemaligen Schichtung getrennt werden (Abb. 13, MRUGALLA 2011).

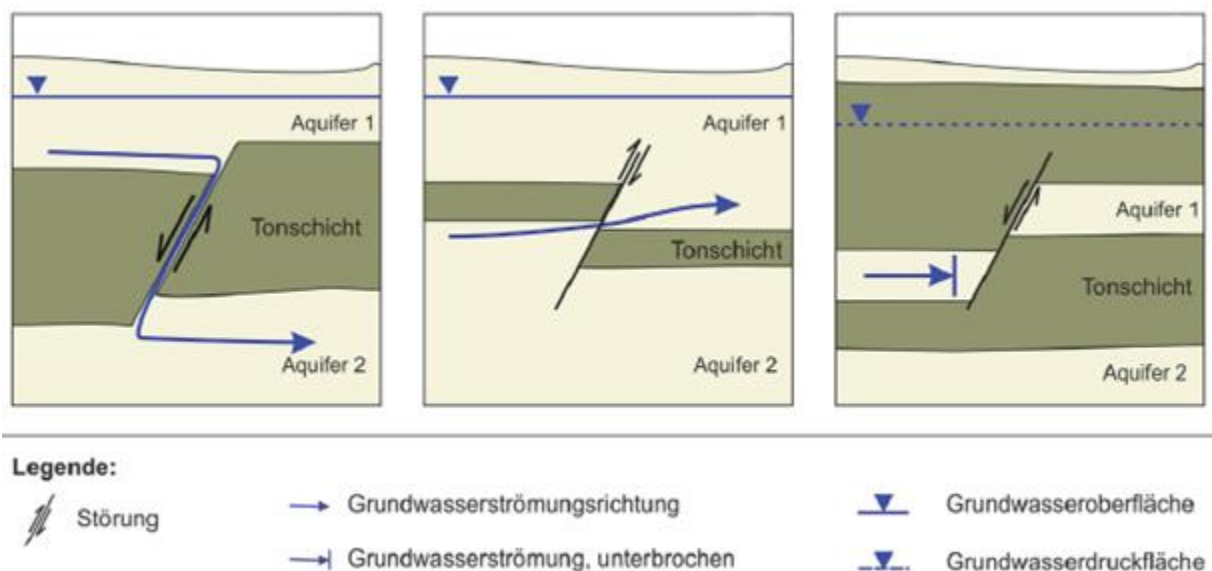


Abb. 13: Auswirkungen von Störungen auf die Grundwasserströmung (MRUGALLA 2011)

Geothermische Messungen des Grundwassers

Wie im Kapitel (über die geothermische Situation im Norddeutschen Becken) bereits erläutert, ist die Wärmezunahme mit der Tiefe im Bereich von Salzstöcken erhöht. Aufgrund der erhöhten Wärmeleitfähigkeiten sind die Salzstöcke Gorleben und Groß Heide-Siemen im Westen durch die ebenfalls erhöhten Grundwassertemperaturen in den überlagernden Schichten gut erkennbar (Abb. 14).

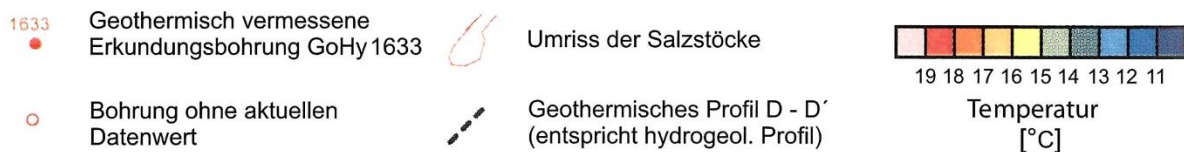
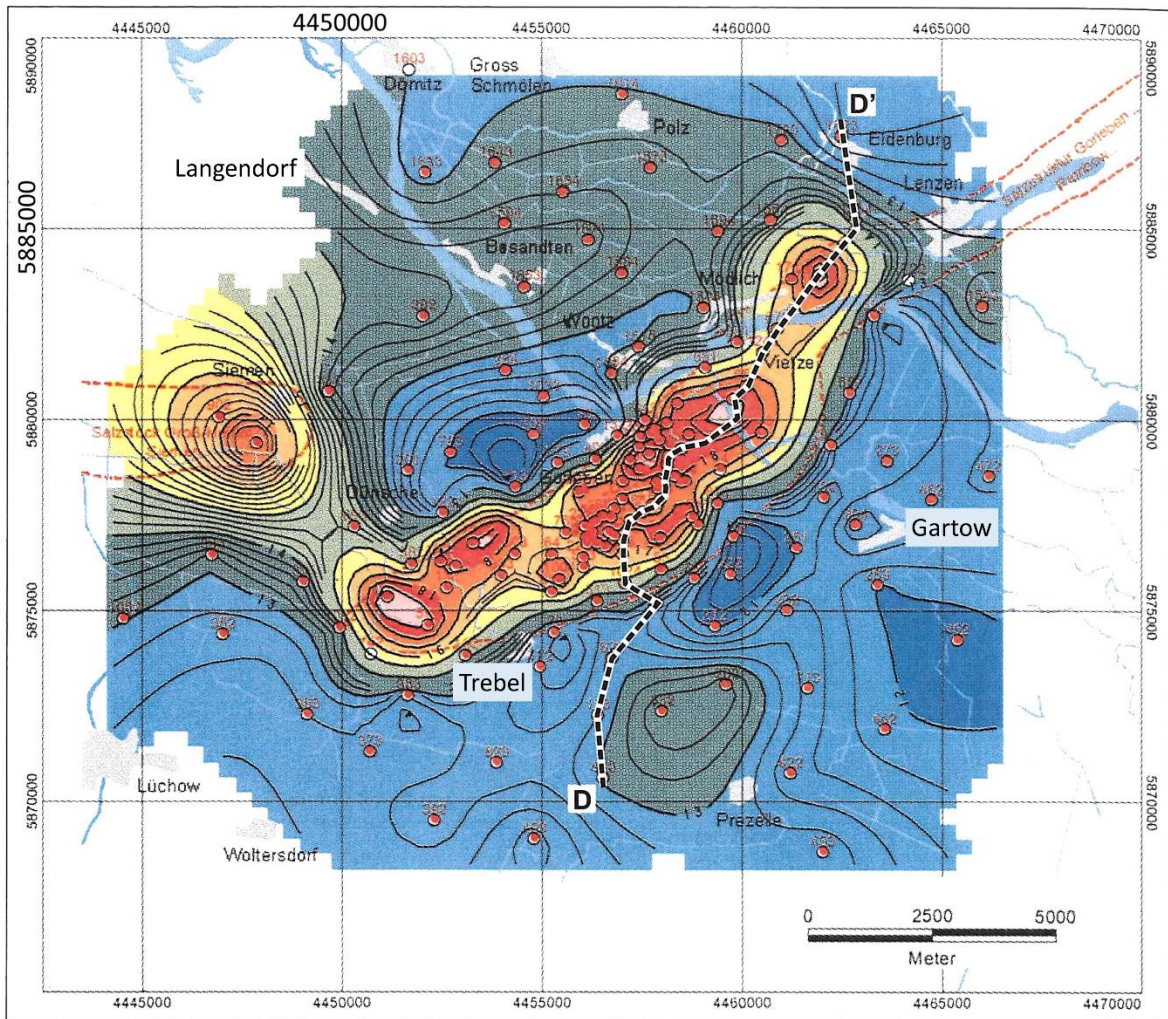


Abb. 14: Grundwassertemperaturen in der Region um den Salzstock Gorleben in 150 m Teufe (KLINGE ET AL. 2007)

Die Temperaturen steigen im Bereich über dem Salzstock lokal auf über 19 °C an. In den Randsenken hingegen werden nur Temperaturen um 10 °C erreicht. Die Durchschnittstemperatur in dieser Region in der Teufe von 150 m liegt eigentlich bei circa 13 °C. In manchen Bohrungen konnte ein lateraler Zustrom von wärmeren Grundwassers nachgewiesen werden, in anderen Bohrungen wird die Temperatur vollständig durch einen vertikalen und konduktiven Wärmestrom bestimmt.

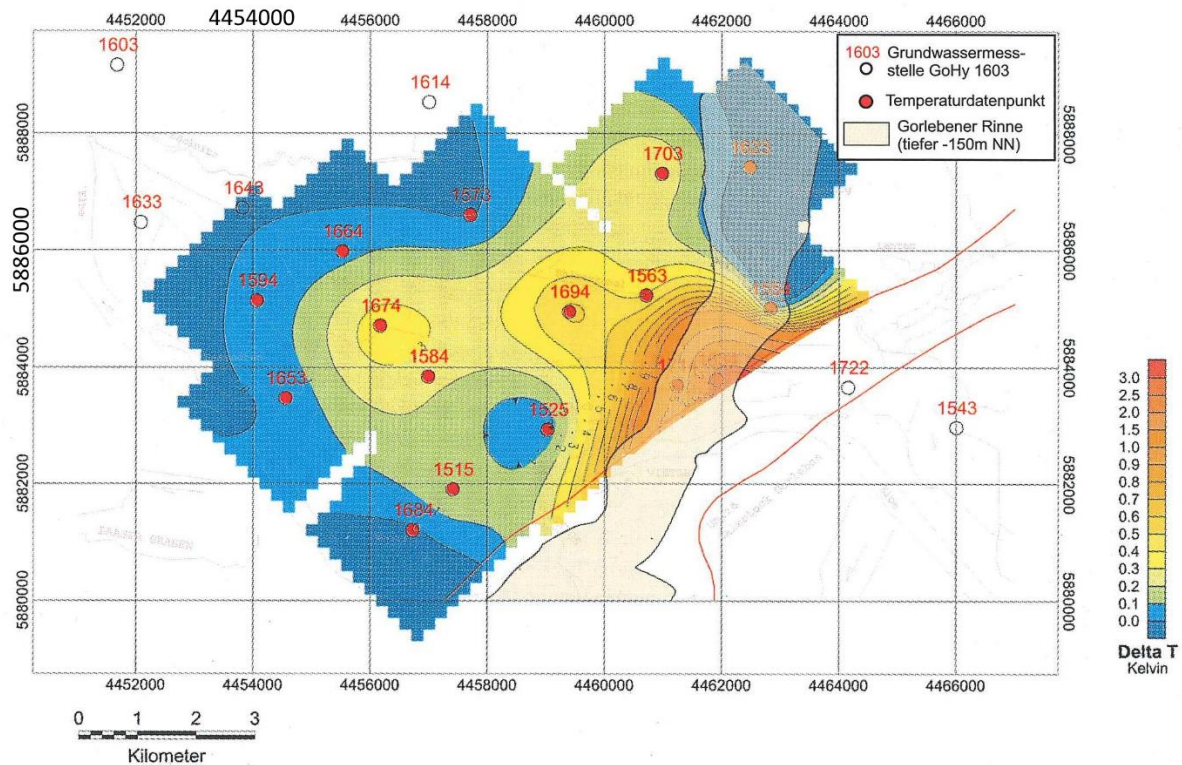


Abb. 15: Verbreitung der advektiven Differenztemperaturen nordwestlich des Salzstocks Gorleben in 180 m Teufe (KLINGE ET AL. 2007).

In Abb. 15 ist die advektive Verbreitung der Grundwasserbereiche mit erhöhten Temperaturen. Hierbei soll angemerkt werden, dass die Grundwassersituation in dieser Ausprägung erst seit der letzten Eiszeit gebildet wurde. Die erhöhten Temperaturen im Grundwasser über dem Salzstock werden außerdem durch die dort herrschende Grundwasserströmung im Laufe der Zeit bewegt. Dadurch kommt es zu einer Verschiebung des Wärmeeindrucks wie er in Abb. 14 zu einer Ausprägung wie in Abb. 15 für den Salzstock Gorleben zu sehen ist. So können Rückschlüsse über die Entwicklung seit der letzten Eiszeit sowohl in Bezug auf Grundwassertemperatur, -bewegung und Chemismus gezogen werden.

Gesamtsalzgehalte und räumliche Verteilung

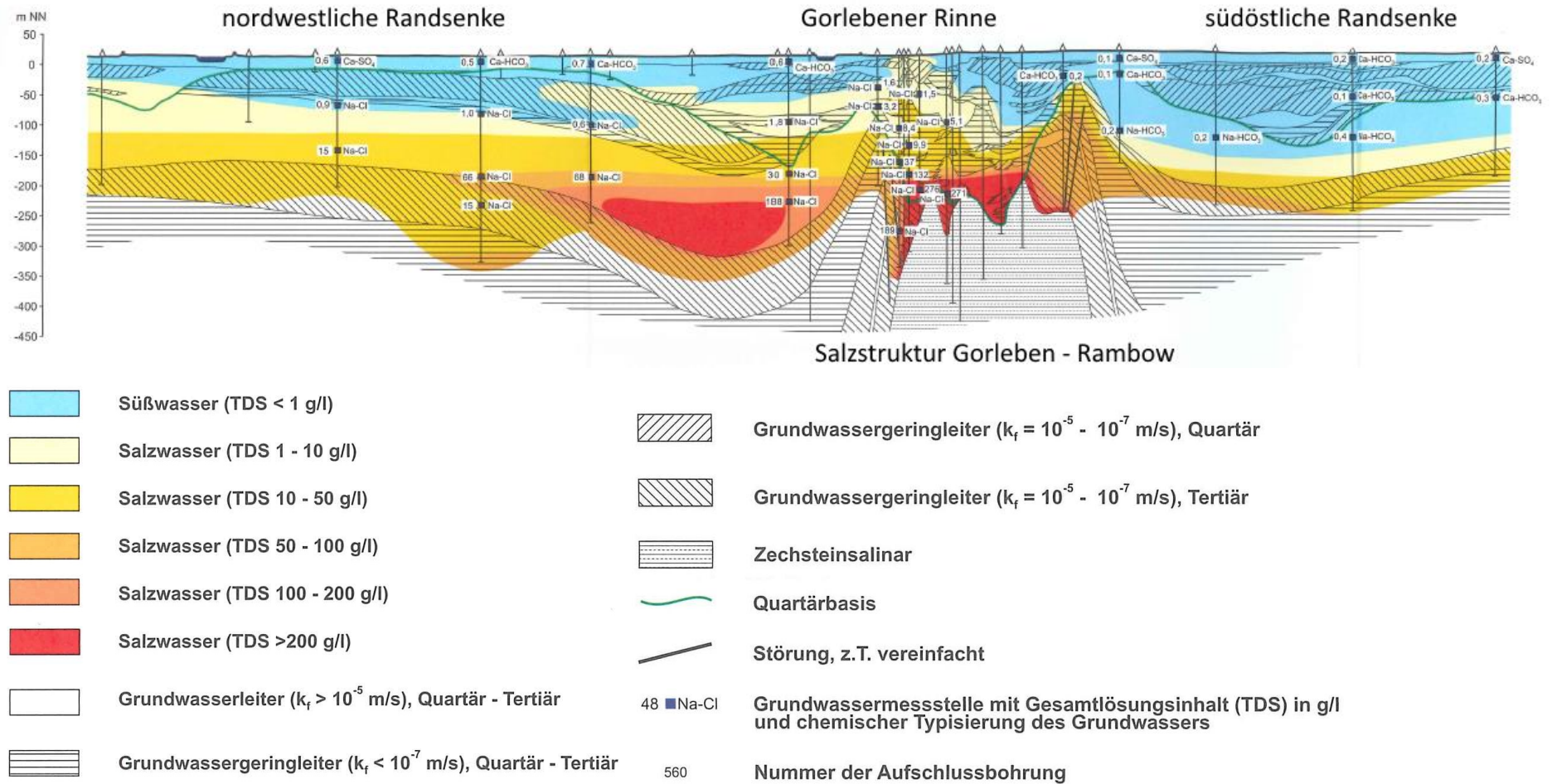


Abb. 16: Hydrochemische Bedingungen in den überlagernden Schichten des Salzstocks Gorleben (NO-SW-Verlauf) (verändert nach KLINGE ET AL. 2007)

Die Gliederung in einen oberen Süßwasserkörper (Gesamtsalzgehalt < 1 g/l) und einen unterlagernden Salzwasserkörper ist im Bereich jedes Salzstockes im norddeutschen Becken zu finden. Abb. 16 zeigt ein Profil, welches den Salzstock Gorleben zentral in NW-SO-Richtung kreuzt und welches die Salzgehalte sowohl durch die Farbgebung, als auch die chemische Zusammensetzung des Grundwassers zeigt. Die Geochemie ergibt sich aus der Wechselwirkung der Grundwässer mit den Sedimenten und durch die mikrobiellen Umsetzungsprozesse.

Die starke Aufsatzung im unteren Bereich der überlagernden Schichten ist durch den Kontakt der Grundwässer mit dem Salzstock innerhalb der Gorlebener Rinne zu erklären. Grundsätzlich steigt der Grad der Versalzung mit der Tiefe, wobei die obersten Bereiche unter der GOK durch versickernden Niederschlag und Grundwasserneubildung geprägt sind.

Grundwasseralter

Durch unterschiedliche Messmethoden (Tritium-Gehalt, Sauerstoff- und Wasserstoffisotope, ^{14}C -Altersdatierung) konnte zusammenfassend festgestellt werden, dass sich innerhalb der Gorlebener Rinne eine sehr komplexe Bildungsgeschichte zeigt (KLINGE ET AL. 2007). Es herrscht nach KLINGE ET AL. (2007) ein engräumiger Wechsel von Salzlösungen pleistozänen und holozänen Alters; die Süßwässer aus beiden Grundwasserleitern stammen aus warmzeitlichen Perioden. Die NaCl-Solen mit den warmzeitlichen Signaturen geben einen Hinweis auf einen Zustrom holozäner Wässer aus dem Süden, die sich mit den pleistozänen Wässern mischen oder diese zum Teil verdrängen. Solen in den Unteren Braunkohlesanden weisen wiederum ein pleistozänes Alter auf, womit laut KLINGE ET AL. (2007) auf einen geringen Grundwasserfluss oder –zustrom geschlossen werden kann. An der Basis der Gorlebener Rinne zeigen die Wässer allerdings holozänes Alter, überlagert von älteren pleistozänen Wässern. Eine Erklärungsmöglichkeit ist nach KLINGE ET AL. (2007) der Zulauf holozänen Grundwassers, welches sich auf dem Weg zur Rinnenbasis aufsalzt und eine Unterschichtung der kaltzeitlichen Wässer ausbildet.

*Bewertungsmaßstäbe für die Untersuchung des Grundwasserfließsystems an einem
möglichen Standort*

Die sehr detaillierte Erkundung am Standort Gorleben durch KLINGE ET AL. (2007) hat weitreichende Erkenntnisse zum generellen Aufbau des Grundwassersystems, Grundwasseralter und Fließrichtung geliefert. Dabei gelangte man zu der Erkenntnis, dass das Süß-/Salzwasser-Fließsystem weitaus komplizierter ist, als es bei ersten Untersuchungen den Anschein hatte. Im Fall des Salzstocks Gorleben musste festgestellt werden, dass hier die Grundwassernichtleiter, zum Teil durch tektonische Beanspruchung während der Eiszeiten, nicht durchgehend vorhanden sind. Es konnten laut KLINGE ET AL. (2007) Grundwasserneubildungsbereiche und Abflusspfade der Grundwässer und die generelle Fließrichtung identifiziert werden. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass sich an der Rinnenbasis Strömungswalzen entgegen der vorherrschenden Fließrichtung aufgrund von Dichteunterschieden ausgebildet haben. Diese hätten wiederum den positiven Effekt von längeren Laufzeiten im Falle einer Radionuklidfreisetzung (KLINGE ET AL. 2007). Solche Erkenntnisse sind wichtig und nur durch eine genaue hydrologische Standorterkundung möglich. Allerdings muss dazu auch deutlich gemacht werden, dass die Hydrologie nur so lange verlässlich bleibt, solange die geogenen Bedingungen konstant bleiben. Das heißt, dass sich wohl spätestens mit Einsetzen einer Kalt- oder einer Eiszeit die hydrologischen Bedingungen grundlegend ändern. Eventuell wird nach einem langen Zeitraum nach Ende einer Kaltzeit wieder der ursprüngliche Zustand erreicht oder es bildet sich ein komplett neues hydrologisches Regime aus.

MRUGALLA (2011) hat wiederum die Bedeutung von Störungen im Deckgebirge für den Grundwasserfluss deutlich gemacht. Störungen, welche durch Subrosion initiiert werden, sind schwer vorherzusagen. Ihre Auswirkungen auf die rezenten Deckschichten wären allerdings ohnehin gering (MRUGALLA 2011). Allerdings ist in Zukunft mit einer weitreichenden Umgestaltung des Deckgebirges durch Kaltzeiten, wie sie sich auch in den vergangenen Kaltzeiten ereignet hat, zu rechnen (MRUGALLA 2011).

Eine genaue Erkundung an einem potenziellen Standort könnte zum Beispiel einen durchgängigen Grundwassernichtleiter identifizieren, der eine zusätzliche Sicherheitsbarriere gegen eine Radionuklidfreisetzung darstellen würde. Eine solche Ausgangssituation wäre bei der Standortauswahl zu bevorzugen. Außerdem können durch Erkundungsarbeiten Standorte identifiziert werden, welche eine Schichtung von salinar gesättigter Lösung über der Salzstockoberfläche und überlagernder ungesättigter Lösung aufweisen. Dies gibt einen

Hinweis auf ein hydrologisches System, das sich in einem stabilen Zustand befindet und bei dem aktuell kein verstärkter Zustrom von ungesättigter Lösung stattfindet.

3.1.5 Neotektonik: Seismische Aktivität, vulkanische Aktivität, Krustenspannungen und Störungszonen

Nach BOETTICHER ET AL. (2011) ist eine Aussage über die Langzeitsicherheit eines Endlagers nur mit der Berücksichtigung der neotektonischen Vorgänge möglich. Damit bezeichnet man tektonische Ereignisse, die in der geologischen Vergangenheit ihren Ursprung haben und unter einem unveränderten tektonischen Spannungsfeld bis in die Gegenwart reichen.

Hierbei muss angemerkt werden, dass insbesondere seismische Ereignisse erst seit relativ kurzen Zeiträumen gemessen werden. Schriftliche Hinweise auf Erdbeben und deren zerstörende Wirkung in der Umgebung gibt es seit einigen Jahrhunderten. Deshalb ist die Aussage für den Zeitraum von einer Million Jahre auf Basis der seismischen Aufzeichnungen mit großen Ungewissheiten behaftet.

Seismische Aktivität

Laut BAHLBURG & BREITKREUZ (2004) findet eine ausgeprägte Erdbebentätigkeit vor allem an Subduktionszonen statt. BAHLBURG & BREITKREUZ (2004) erklären weiter, dass erdbebenreiche Regionen und der Grund ihrer geographischen Lage gut bekannt sind. Kurzfristige Vorhersagen von Erdbeben in Zeiträumen von Wochen oder Tagen seien dabei problematisch, langfristige Vorhersagen mit Zeiträumen von mehreren Jahrzehnten seien hingegen mit heutigen Methoden mit großer Gewissheit machbar (BAHLBURG & BREITKREUZ 2004).

Nach MRUGALLA (2011) entstehen Erdbeben durch die schlagartige Freisetzung von Deformationsenergie und sind zu 95 % an den Plattengrenzen lokalisiert. Die Ursache von Erdbeben kann tektonisch, vulkanisch oder anthropogen, z.B. durch Explosionen, induziert sein. Wie bereits im Kapitel über die *Vollständige Inlandvereisung* erläutert, kann auch die isostatische Ausgleichsbewegung nach Rückzug des Gletschers Erdbeben und die Bildung von Störungszonen auslösen. Ebenso kann das plötzliche Entleeren von Eisstauseen die Spannungsverhältnisse sehr schnell verändern und zu einer Freisetzung von Deformationsenergie führen (MRUGALLA 2011).

Das Auftreten von Erdbeben ist weltweit durch das dichte Netz seismischer Stationen sehr gut dokumentiert. Beispielsweise betreibt das GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) einen globalen seismischen Monitor mit mehr als 700 Messstationen weltweit, der jedes seismische Ereignis, welches von mehr als 25 Stationen detektiert wurde, aufzeichnet. Die BGR veröffentlichte im Jahr 2011 Karten vergangener Erdbeben aus den Jahren 800 bis 2008 von Deutschland und angrenzenden Gebieten (Abb. 17).

Gut zu erkennen ist hierbei die Konzentration seismischer Ereignisse auf den Bereich der Alpen, des Rheingrabens, der Schwäbischen Alb und des Vogtlands (Abb. 17 und Abb. 18). In Norddeutschland hingegen sind nur vereinzelt Ereignisse natürlichen Ursprungs verzeichnet, wovon keines eine Intensität von über 6,5 aufweist.

Nach MRUGALLA (2011) können stärkere Beben im Deckgebirge zu Auflockerungs- und Störungszonen im Meterbereich führen. Um die Auswirkungen von Erdbeben in einem Salzstock einschätzen zu können, wurden Gebirgsschläge als natürliches Analogon anhand von direkten Messungen und geomechanischen Modellrechnungen untersucht (MRUGALLA 2011). Die Versuche zeigten, dass das Salz aufgrund seiner plastischen Eigenschaften nicht verletzt wurde und auch Hohlräume im Salinar ohne Schäden geblieben sind. Vergleicht man die Auswirkungen eines Gebirgsschlags im Salinar mit der Auswirkung eines seismischen Ereignisses in Norddeutschland auf den Salzstock, ist die Intensität des Gebirgsschlags weitaus höher anzusehen (MRUGALLA 2011).

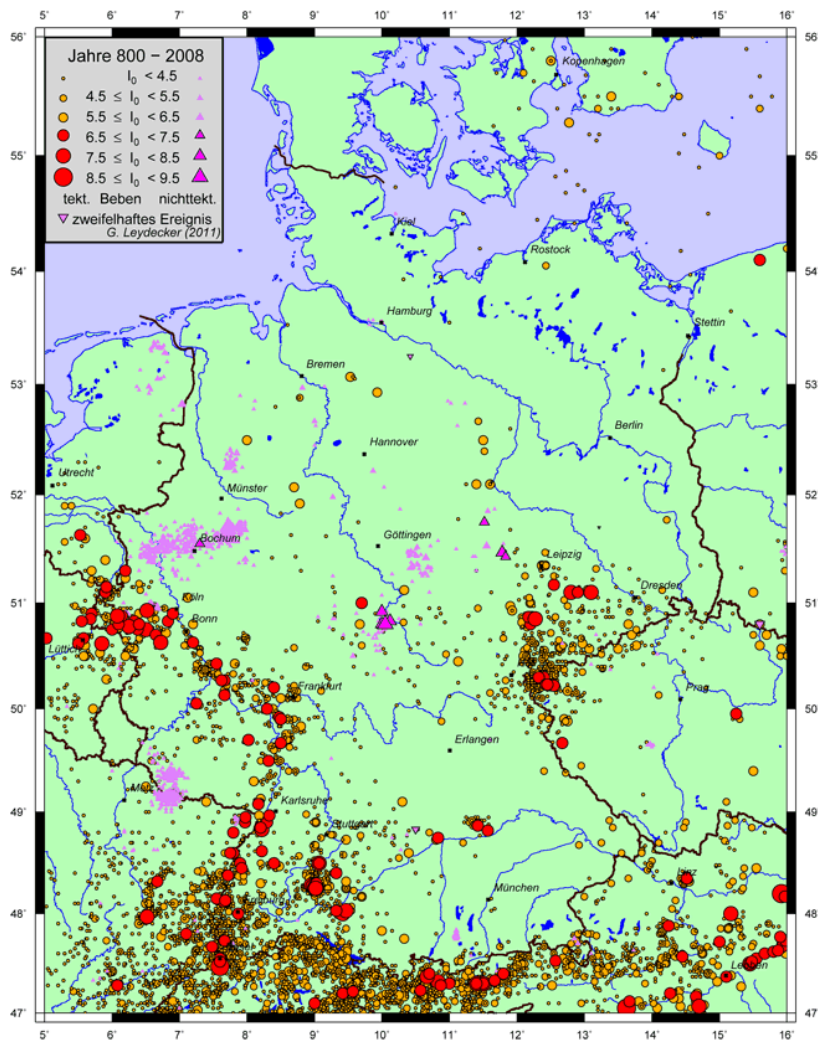


Abb. 17: Karte der Erdbebenepizentren in Deutschland und angrenzenden Gebieten von 800 – 2008. Die Intensitäten I_0 der Epizentren sind in der Legende dargestellt (LEYDECKER 2011)

Magmatismus

Partielle Aufschmelzung und Magmenbildung kann an Plattenrändern innerhalb von kontinentaler oder ozeanischer Lithosphäre stattfinden. Der Aufstieg des Magmas erfolgt dabei entweder durch Auftrieb des Materials oder durch hydrostatischen Druck. Weltweit wird versucht, aktive sowie ruhende Vulkane zu überwachen. Allerdings sind die Vorhersage eines möglichen Ausbruchs und eine Abschätzung der Intensität der Eruption bei Vulkanen mit langen Ruhephasen von mehr als 100 Jahren schwierig (BAHLBURG & BREITKREUZ 2004).

Tiefreichende aktive Störungszonen können eine Wegsamkeit für Magmen darstellen. Mit dem Magmenaufstieg ist eine Änderung des angrenzenden Temperaturfeldes und der

geothermischen Bedingungen verbunden. Außerdem können neben flüssigen Bestandteilen auch Gase transportiert werden (MRUGALLA 2011), die bei Druckentlastung entweichen.

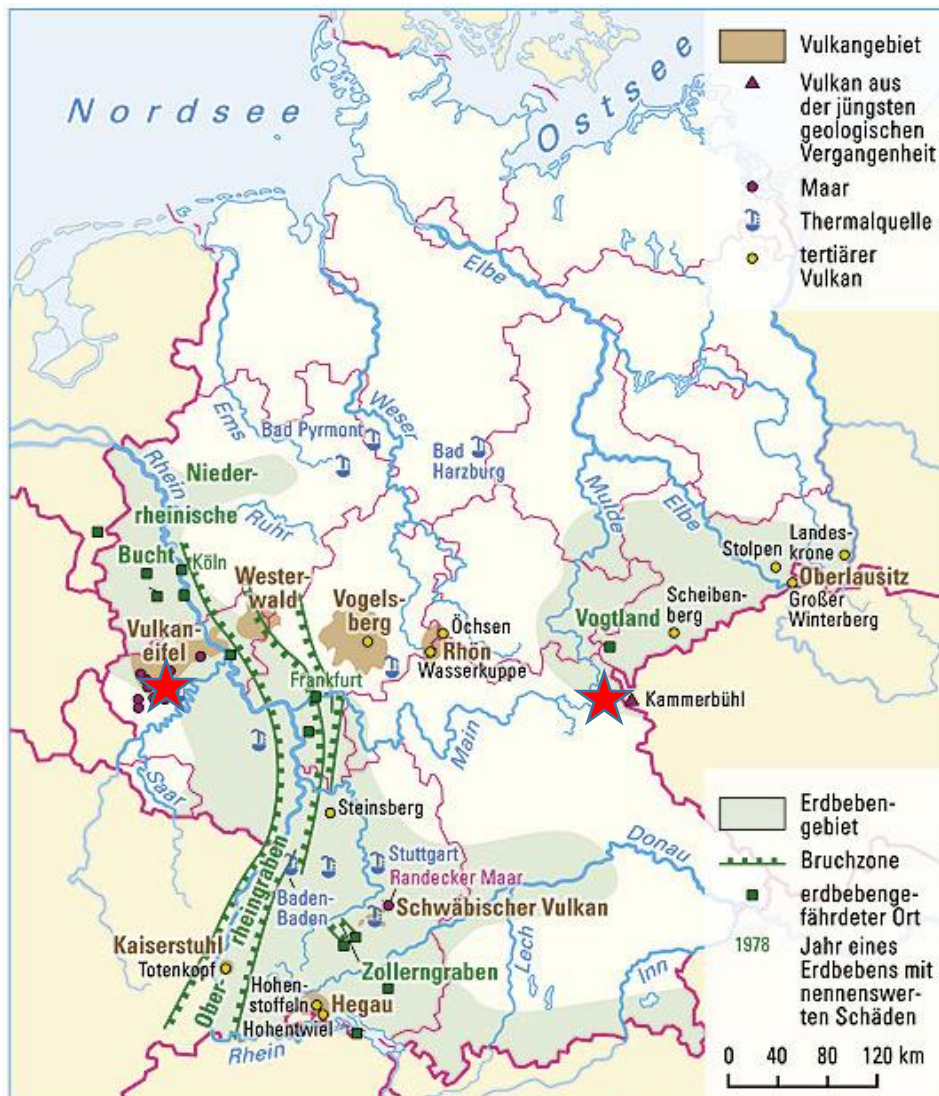


Abb. 18: Lage der Erdbeben- und Vulkangebiete in Deutschland (verändert nach SIEBERT 2012). Die roten Sterne kennzeichnen Gebiete, welche innerhalb der letzten Million Jahre aktiv waren.

In Deutschland ist im Moment kein Vulkan aktiv. Die einzige Region in Deutschland, die nur als „ruhend“ bezeichnet wird, ist die Eifel (KIRSCHSTEIN 2014). Allerdings kann man in der Vergangenheit aktive Regionen benennen (Abb. 18). Die beiden Gebiete, welche im Zeitraum eine Million Jahre vor heute aktiv waren, sind die Vulkaneifel (KIRSCHSTEIN 2014) und die Oberpfalz (N-TV 2015) (Abb. 18, rote Sterne). In der Abbildung gut zu erkennen ist darüber hinaus das Fehlen vulkanischer Aktivität im norddeutschen Raum. Ein zukünftiger eiszeitlicher

Auslöser für Magmatismus kann nach MRUGALLA (2011) ebenfalls ausgeschlossen werden, da die zu erwartende Eisauflast keine tiefreichenden Störungen oder starke Krustenbewegungen auslösen wird, die zu tektonischen Schwächezonen und zum Magmenaufstieg führen könnten. Der AKEND (2002) schlägt darüber hinaus vor, einen Sicherheitssaum von 10 km um einen durch Vulkanismus gefährdeten Bereich aus der Standortauswahl auszuschließen.

Krustenspannungen und Störungszonen

Störungen im Gesteinsverbund können an der Art der Bewegungen unterschieden werden. So können beispielsweise Abschiebungen, Aufschiebungen, Überschiebungen und Blattverschiebungen stattfinden. Die stattfindenden Bewegungen sind nicht immer konstant und können sich im Laufe der Zeit ändern. Durch seismologische Messsysteme können aktive Bewegungen, auch in größeren Tiefen, beobachtet und kartiert werden (BAHLBURG & BREITKREUZ 2004).

MRUGALLA (2011) fasst Störungen als einen Versatz entlang einer Bruchfläche infolge von Spannungszuständen (Kompression oder Extension) zusammen. Unter anderem können überregionale tektonische Vorgänge, Diapirismus und Subrosion Ursachen für das Auftreten von Spannungen, Spannungsänderungen und das Auftreten von tektonischen Erdbeben sein (MRUGALLA 2011, BRASSER ET AL. 2008). Ein Endlager und vor allem dessen Barrierensystem können so in tektonisch aktiven Gebieten negativ beeinflusst werden (BRASSER ET AL. 2008). Relevant für die Sicherheit eines Endlagers sind alle Störungen im Zeitraum Rupel (Unteroligozän) bis heute, die mit seismischen Ereignissen verbunden sind und/oder an denen ein Fluid- und/oder Gastransport stattfinden kann (BRASSER ET AL. 2008).

Die Festlegung dieses Zeitraums ist allerdings willkürlich gewählt und der Rupel ist nicht durchgehend in ganz Deutschland ausgebildet. Deshalb soll hier empfohlen werden, dass das gegenwärtige Spannungsfeld im Detail betrachtet und kartiert wird, um so mögliche Bereiche mit Bewegungen zu identifizieren. REICHERTER ET AL. (2005) beschreiben, dass eine Beschreibung der Geomorphologie unter Einbeziehung von klimatischen Faktoren, Erosion und aktueller Verhältnisse Ausgangsdaten für die Quantifizierung der aktuellen tektonischen Situation geben kann. Es wird weiter betont, dass zum Beispiel Flussläufe oft an Störungen und Blockgrenzen orientiert sind. Das heißt, dass eine Analyse der rezenten Topographie Rückschlüsse auf die tektonische Situation im Untergrund geben kann (REICHERTER ET AL. 2005).

BOETTICHER ET AL. (2011) erklären das Spannungsregime in Norddeutschland wie folgt: Im nördlichen Mitteleuropa dominieren großräumige Bewegungen, die durch die fortgesetzte Hebung Skandinaviens, das Ostbaltische Grabensystem und die Mitteleuropäische Senkungszone (begleitet durch die mitteleuropäische Hebungszone) ausgelöst werden. Daraus resultiert nach BOETTICHER ET AL. (2011) die vorwiegende NW-SO Streichrichtung der Deckgebirgsstrukturen und Störungen. In Richtung Osten dreht die Hauptspannungsrichtung von NW nach NNO (Abb. 19). Auch tektonische Vorgänge in den Alpen und den Karpaten können zur Reaktivierung geologischer Blockgrenzen in Norddeutschland führen (BOETTICHER ET AL. 2011). Daraus resultieren ebenfalls NW-SO- und NNO-SSW-streichende Störungszonen. Das aktuelle Spannungsfeld in Mitteleuropa ist gekennzeichnet durch eine NW-SO-gerichtete Kompression und eine NO-SW-orientierte Extension und begann im späten Miozän (Abb. 19). Allerdings ist während des gesamten Känozoikums eine Abnahme der tektonischen Aktivität zu erkennen (BOETTICHER ET AL. 2011).

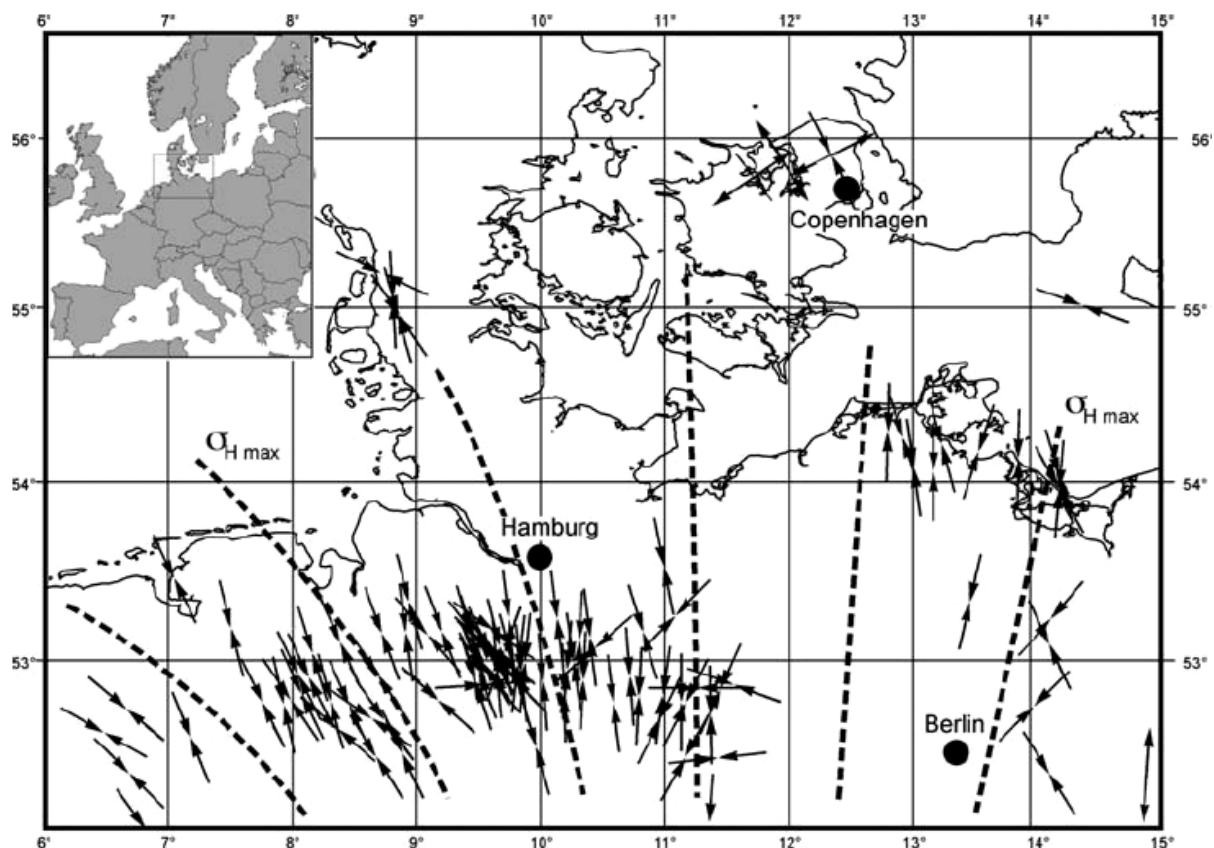


Abb. 19: Vorherrschendes Spannungsregime in Norddeutschland. Die gestrichelten Linien zeigen die Hauptspannungsrichtungen: NW-SO-Richtung im westlichen Teil des Kartenausschnitts, N-S-Richtung im zentralen und NNO-SSW-Richtung im östlichen Bereich. Die Pfeile verdeutlichen die Kompressions- und Extensionsbewegung, die vorwiegend in Richtung NW-SO und NO-SW orientiert sind (REICHERTER ET AL. 2005)

Darüber hinaus wird die tektonische Situation laut BOETTICHER ET AL. (2011) von der Mitteleuropäischen Senkungszone mit einem NW-SO-Verlauf definiert, die von der Nordsee über das Norddeutsche Becken bis nach Südpolen verläuft. Im Nordseebecken fanden epirogenetische Absenkungen von über 800 m statt, wohingegen sich der daran anschließende südwestliche Teil intensiv gehoben hat und in die Mitteleuropäische Hebungszone übergeht. Die Randstörungen sind NW-SO-orientiert, innerhalb des Senkungsbereichs treten aber auch Querstörungen mit einem SW-NO-Verlauf auf (BOETTICHER ET AL. 2011). Auch diese tektonische Aktivität hat seit dem mittleren Miozän stark abgenommen. Darüber hinaus werden diese Störungsmuster durch glazigene Vereisungsphasen beeinflusst. So kam es laut BOETTICHER ET AL. (2011) z.B. zu einem absoluten Hebungsbetrag von ca. 300 m aufgrund isostatischer Ausgleichsbewegungen nach der letzten Vereisungsphase. Die möglichen Auswirkungen auf einen Salzstock, wie die Reaktivierung von Kluftsystemen und/oder eines Salzaufstiegs wurden bereits in Abb. 6 gezeigt und im Kapitel 3.1.1 erläutert. Hierzu stellen REICHERTER ET AL. (2005) fest, dass nach Eiszeiten im Norddeutschen Becken eine deutliche Reaktivierung vorhandener Störungen beobachtet werden konnte. Dies geschah auch in deutlicher Entfernung zur ehemaligen glazigenen Auflast.

Bewertung eines Endlagers in Hinblick auf die neotektonische Situation in Norddeutschland

Die Erdbebensituation wird an manchen Orten seit Jahrhunderten dokumentiert und gemäß dem Stand der Technik überwacht. Zudem konnte durch Beobachtungen von Gebirgsschlag die Gefährdung, die von einem seismischen Ereignis ausgehen würde, abgeschätzt werden (MRUGALLA 2011). Für die Dauer von einer Million Jahre wird laut MRUGALLA (2011) nicht von einem Erdbebenereignis ausgegangen, welches die eingelagerten Abfälle gefährden könnte.

Im norddeutschen Raum ist darüber hinaus für den geplanten Einlagerungszeitraum nicht mit dem Auftreten magmatischer Ereignisse zu rechnen (MRUGALLA 2011). Auch diese Einschätzung kann durch die sehr genaue Beobachtung und Dokumentation von vulkanischen Ereignissen getroffen werden. Eine Gefahr für die radioaktiven Abfälle durch ein magmatisches Ereignis könnte auch nur bei Durchschlagen des ewG durch aufsteigendes Magma entstehen (MRUGALLA 2011). Die Folge wäre beispielsweise eine Kontaktmetamorphose des angrenzenden Salzgesteins oder die Schaffung einer Wegsamkeit bei Abkühlung des Magmengangs.

Nach BOETTICHER ET AL. (2011) können aktive Krustenspannungen zur Neuanlage von Deformationsstrukturen und Störungen führen, abhängig von der Magnitude der Spannungen und der Gesteinszusammensetzung im Untergrund; die Auswirkungen eines solchen Spannungsregimes könnten z.B. Erdbeben sein. Ebenso kann ein Salzaufstieg nicht nur halokinetisch durch den Dichteunterschied von Salz- und Nebengestein ausgelöst werden, sondern auch durch tektonische Vorgänge (BOETTICHER ET AL. 2011). So wird nach BOETTICHER ET AL. (2011) die Bildung von einigen Salzkissen und Salzmauern in Nordwestdeutschland mit der Aktivität von Sockelstörungen begründet. Auch KÖTHE ET AL. (2007) und MRUGALLA (2011) beschreiben, dass Sockelstörungen oft die Diapirbildung eines Salzstocks begünstigen oder auslösen können.

Zukünftige Krustenmobilität wird an existierenden regionalen Störungen stattfinden (BOETTICHER ET AL. 2011). MRUGALLA (2011) schließt allerdings eine tektonisch aktivere Phase im Zeitraum von einer Million Jahren im Norddeutschen Becken aus.

Hierbei soll angemerkt werden, dass eine Diskussion zwischen Dr. Ulrich Kleemann (Kleemann 2011) und der BGR bezüglich der Existenz von Störungen unter dem Salzstock Gorleben geführt wurde. Die BGR hat 1984 drei Salzstock- bzw. Salzflankenunterschießungen durchgeführt, um die Existenz einer Sockelstörung zu untersuchen. Hierbei und bei zusätzlichen Bohrungen wurden keine Störungen detektiert. Allerdings wurden die 2D-seismischen Messungen mit einer Auflösung von 50 m erstellt, d.h. dass eine Störung mit einem Versatz kleiner 50 m theoretisch unentdeckt geblieben sein könnte (BGR 2011). Die Existenz auch kleiner Störungen sollte allerdings zweifelsfrei feststehen, um die Genese des Salzstocks und das regionale Spannungsregime zu verstehen und mögliche Wegsamkeiten zu erkennen.

Es ergeben sich aus der seismischen und vulkanischen Aktivität, sowie dem vorherrschenden Spannungs- und Störungsregime folgende Kriterien:

- Ausschluss von Gebieten, in denen mit einem erhöhten Erdbebenrisiko zu rechnen ist.
- Ausschluss von Gebieten, in denen vulkanische Aktivität herrscht oder in denen im Nachweiszeitraum von einer Million Jahren mit vulkanischer Aktivität gerechnet werden muss. Außerdem wird empfohlen, um diese Bereiche eine Sicherheitszone zu veranschlagen. So können zukünftige Schäden auch in der nahen Umgebung, z.B. der übertägigen Anlagen vermieden werden.

- Ausschluss von Gebieten, in denen aktive Störungszonen oder Verwerfungen bekannt sind, die in Zusammenhang mit seismischen Ereignissen und/oder mit Fluidtransport stehen.

3.1.6 Nicht glazial bedingte Vertikalbewegungen, Erosion und Subrosion bei gemäßigten Klimaten

BRASSER ET AL. (2008) beschreiben in ihrem Bericht zur Standorterkundung des Salzstocks Gorleben das geologische Endlagersystem und die genannten Prozesse im Detail. Die nachfolgenden Ausführungen stammen, wenn nicht anders deklariert, aus diesem Bericht.

So können laut BRASSER ET AL. (2008) Vertikalbewegungen natürliche oder anthropogene Ursachen (in diesem Fall meist als Begleiterscheinung von Bergbauaktivitäten) besitzen. Wichtig für die Planung eines Endlagers sind aber vor allem die natürlichen Bewegungen. Erhöhte Vertikalbewegungen sind oft verknüpft mit geodynamischen Aktivitäten, wie Erdbeben oder dem Auftreten von Störungszonen. Die Epirogenese beschreibt generell die langsame Hebung oder Senkung der Erdkruste und ist meist großräumig angelegt. Der Grund hierfür ist die Isostasie, also eine ausgleichende Bewegung, wie z.B. die verstärkte Hebung eines Gebietes nach dem Gletscherrückzug oder auch eine Massenverlagerung im tiefen geologischen Untergrund. In Gebieten ohne halokinetische Vorgänge entsprechen die Sedimentmächtigkeiten meist in etwa den Absenkungsraten.

Für den Salzstock Gorleben wurden nach BRASSER ET AL. (2008) genauere Untersuchungen zu Hebungs- und Senkungsraten durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Salzstockoberfläche seit Malm bis heute mit einem maximalen Betrag von 0,08 mm/a gehoben hat. Die Umgebung um den Salzstock hat sich im Zechstein um 0,25 mm/a abgesenkt, was die größte Vertikalbewegung darstellt. Im Untermiozän wird eine Absenkungsrate von 0,013 mm/a angenommen. Danach fehlen epirogenetisch bedingte Sedimente, was auf eine sehr geringe Bewegungsrate hindeutet.

Unter dem Begriff Erosion werden alle Vorgänge zusammengefasst, welche verwittertes oder loses Gesteinsmaterial durch Wasser, Wind, Gletscher oder Gravitation bewegen und abtransportieren. Theoretisch kann durch Erosion die Barrierenmächtigkeit reduziert und damit Wegsamkeiten und Hohlräume geschaffen sowie die Isolationswirkung gemindert werden.

Die Subrosion stellt eine Spezialform der Verwitterung dar und beschreibt die Lösung unterirdischer sowie leicht löslicher Gesteine, vor allem von Chloriden, Karbonaten und Sulfaten. Eine Subrosion am Hut oder an den Flanken eines Salzstocks kann die Barrierenwirkung des Salzgesteins durch Reduzierung der Mächtigkeit stark negativ beeinträchtigen. Die Ablaugung ist nicht immer flächenhaft, sondern kann auch verstärkt lokal auftreten.

In BRASSER ET AL. (2008) wird beschrieben, dass in einer Randsenkenanalyse für den Salzstock Gorleben ein durchschnittlicher Salzaufstieg von ungefähr 0,01–0,02 mm/a ermittelt wurde. Ohne Subrosionsvorgänge ergibt sich daraus ein reiner Hebungsbeitrag von 10–20 m in einer Million Jahren. BRASSER ET AL. (2008) erläutern für den Fall, dass die Hebungsbeträge vollständig durch Subrosion ausgeglichen werden würden, eine Ablaugung von 500 m Salzüberdeckung in 25–50 Mio. Jahren stattfinden könnte. Anders sieht die Situation am bestehenden Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben aus. Die Rekonstruktion der Salzstockentwicklung lässt auf frühe Subrosionsprozesse schließen, in welchen der Salzkörper durch Erosion der überlagernden Schichten in das Ablaugungsniveau geraten ist. Dadurch konnte eine 500–1000 m breite und bis zu 240 m tiefe Subrosionswanne entstehen, die durch Sedimente aus den umliegenden Hochgebieten aufgefüllt wurde (BRASSER ET AL. 2008). Nach einer Unterbrechung der Subrosion finden seit dem Tertiär bis heute andauernde Subrosionsprozesse statt. Modellierungen zeigen, dass 73 % des mobilen Salzes im Vergleich zur Primärmächtigkeit gelöst oder erodiert wurden. Die aktuelle Mächtigkeit von durchschnittlich 490 m ist geringer als ursprünglich im Zechstein primär gebildet. Der heutige Salzstock wird nach BRASSER ET AL. (2008) nur als rudimentäres Restvorkommen betrachtet.

Bewertung eines Endlagers durch den Einfluss von Vertikalbewegungen, Erosion und Subrosion

Eine Vertikalbewegung am in Frage kommenden Standort kann in den meisten Fällen durch Betrachtungen zur Mächtigkeit der abgelagerten Sedimente bzw. zum Fehlen selbiger abgeschätzt werden. Grundsätzlich sollte beachtet werden, dass eine verstärkte vertikale Hebung auch eine verstärkte Erosion zur Folge hat. Rein theoretisch könnte ein in 1000 m Tiefe errichtetes Endlager bei einer konstanten Hebungsrate von 1 mm/a und gleichzeitiger konstanter Erosion im Zeitraum von einer Million Jahren freigelegt werden. Dabei muss allerdings angemerkt werden, dass durch die sichere Überführung von Teilen Norddeutschlands durch Gletscher in einer oder mehreren Kaltzeiten eine konstante Hebung oder Senkung nicht stattfinden wird. Eine Überdeckung durch einen Gletscher wird eine lokale

Senkung der Erdkruste zur Folge haben, die abhängig sowohl von der Gletschermächtigkeit und der Dauer der Überdeckung ist. Ebenso wird nach dem Rückzug des Gletschers eine isostatische Ausgleichsbewegung stattfinden. Trotzdem müssen Hebungs- und Absenkungen so genau wie möglich bekannt sein, um diesen Effekten, wie die Reduzierung der Barrierenmächtigkeit oder der Schaffung von Wegsamkeiten, durch eine geeignete Tiefenlage des Endlagers entgegen wirken zu können.

Die Subrosionsvorgänge der Standorte Gorleben und Morsleben im Vergleich haben gezeigt, dass die Entwicklung eines Salzstocks sehr unterschiedlich stattfinden und die Subrosion einen erheblichen Teil des Salzstocks ablaugen kann. Allerdings kann auch nach Einschätzung von BRASSER ET AL. (2008) eine Gefahr für ein Endlager minimiert werden, wenn die geologische Situation und Entwicklungsgeschichte eines Salzstocks gut bekannt sind. Nach BRASSER ET AL. (2008) sind Standorte, bei denen der Salzaufstieg zum größten Teil abgeschlossen ist, weniger durch selektive Ablaugung gefährdet.

Entscheidend ist eben auch hier, dass eine Freilegung des ewG verhindert wird. Die Netto-Abtragungsrate ist also ein entscheidender Parameter, dem die Gegebenheiten am Standort (Mächtigkeit der Überdeckung) Stand halten müssen. Ebenso muss die Integrität trotz eventuell vorhandener Störungen gewahrt sein. Deshalb müssen das tektonische Spannungsfeld so gut wie möglich bekannt sein, um Bewegungsrichtungen abschätzen zu können.

Anhand dieser Informationen müssen in zukünftigen Endlagerkonzepten Sicherheitsabstände festgelegt werden. Beim geplanten Einlagerungskonzept am Standort Gorleben wurde ein Sicherheitsabstand von nur 50 m um den Einlagerungsbereich zu lithologischen Einheiten außerhalb des Hauptsalzes veranschlagt; günstiger wird eine vertikale Ausdehnung des ewG von 150 m angesehen (FISCHER-APPELT ET AL. 2013). Daraus würde sich bei der Bohrlochlagerung zu den Bohrlochlängen von 300 m ein Aufschlag von 50 m über der aufgefahrenen Strecke (~ 6 m Höhe) und 50 m unter dem Bohrlochtiefsten ergeben.

Der in der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG) zu Grunde gelegte Sicherheitsabstand stammt aus einem Bericht von MINKLEY & POPP (2010), in dem konkret Barrierenmächtigkeiten für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle diskutiert werden. Darin wird erklärt, dass die Sicherheitsabstände sowohl auf praktischen Erfahrungen im Salzbergbau, auf natürlichen vergleichbaren Beispielen zur Belastbarkeit von salinaren Barrieren, wie auch auf geomechanischen Modellrechnungen beruhen. Als Empfehlungen und

unter Berücksichtigung einer maximal zulässigen Temperatur von 200 °C an der Behälteroberfläche werden folgende Sicherheitsabstände genannt:

- ≥ 350 m als Barrierenmächtigkeit zum Salzspiegel
- ≥ 200 m als Barrierenmächtigkeit zu den Salzstockflanken
- ≥ 50 m als Barrierenmächtigkeit zu Kaliflözen und zu Anhydritgestein

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Flächenbedarf für das Endlager alleine (ohne Sicherheitsabstand) aus den Gesamtdarstellungen der Konzepte in BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) berechnet. Er beträgt bei Streckenlagerung ca. 2,6 km² und bei Bohrlochlagerung 1,7 km². Rechnet man den Sicherheitsabstand von 50 m zum umgebenden Gestein mit ein, ergeben sich ungefähre Werte für den Flächenbedarf von 3,4 km² für Streckenlagerung und 2,2 km² für Bohrlochlagerung. Allerdings sind diese Werte nur Abschätzungen nach den Darstellungsskizzen der Konzepte aus BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) und sind deshalb nur als überschlägige Angaben zu betrachten.

Laut DBE TECHNOLOGY GmbH (2016) wurden für verschiedene Behältertypen Auslegungsberechnungen für unterschiedliche Lagerungsvarianten berechnet. Die Berechnungen wurden sowohl mit einer maximal zulässigen Temperatur von 200 °C und von 100 °C (Grenztemperatur Kontaktfläche Behälter-Wirtsgestein) durchgeführt. Der Gesamtflächenbedarf (Einlagerungsfläche, Sicherheitsabstände und Infrastruktur) entspricht bei einer maximal zulässigen Temperatur von 200 °C 1,28 km², für die Variante mit einer Maximaltemperatur von 100 °C 2,28 km². Dabei wurde ein Einlagerungshorizont in 600 m Teufe und eine Gebirgstemperatur von 27 °C zu Grunde gelegt. Darüber hinaus wurde von einer einsöhligen Streckenlagerung und einem Sicherheitsabstand um die Strecken von 50 m ausgegangen (DBE TECHNOLOGY GmbH 2016).

Es ergeben sich aus dem Einfluss von Vertikalbewegungen, Erosion sowie Subrosion folgende Kriterien:

- Eine Freilegung und Schädigung des ewG muss vermieden werden. Standorte bei denen eine Freilegung wahrscheinlich ist, müssen aus dem Verfahren ausgeschlossen werden.
- Standorte, bei denen eine geringe oder keine Vertikalbewegung stattfindet und die Netto-Abtragungsrate ebenfalls gering ist, sind zu bevorzugen.

3.2 Wasserwirtschaftliche und raumplanerische Kriterien, sonstige öffentliche Belange

Nach dem StandAG sollen auch wasserwirtschaftliche und raumplanerische Kriterien, sowie sonstige öffentliche Belange in die Überlegung einbezogen werden, welche zum Ausschluss eines Gebietes im ersten Schritt des Auswahlverfahrens führen könnten. Zur Raumplanung gehören auch die Prognose von Städteentwicklungen und die Abschätzung von Zu- und Abwanderungsgebieten, aber Aussagen über Veränderungen in Zeiträumen über wenige hunderte Jahre hinaus sind schwer zu treffen. Deshalb beziehen sich die nachfolgenden Überlegungen alle auf den rezenten Entwicklungsstand und sind eher für die Planung, Errichtung und eine zeitlich begrenzte Nachbetriebsphase entscheidend, aber nicht für den Zeitraum von einer Million Jahren.

Wasserwirtschaftliche Kriterien

Bei der Planung eines Endlagers sollten Grundwassernutzungsgebiete und Wasserschutzgebiete sowie Standorte von Heilquellen vermieden werden.

Ziel laut § 1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG 2009) ist es, „die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen“. Nach § 51 Abs. 1 WHG sind „Gewässer im Interesse der derzeit bestehenden oder künftigen öffentlichen Wasserversorgung vor nachteiligen Einwirkungen zu schützen“. Außerdem gehören solche Gebiete auch zu den Schutzgütern nach dem Gesetz der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG 1990). Da der Schutz durch die Erkundung eines Standortes, die Errichtung einer Untertageeinrichtung, sowie durch das Einbringen von radioaktiven Schadstoffen nicht gewährleistet werden kann, sind diese Regionen vom Verfahren auszuschließen.

Bekannte Überflutungsbereiche in der Nähe von Flüssen oder Wasserflächen könnten ebenfalls die Erkundung eines Gebietes stören oder die Errichtung erschweren. Grundsätzlich stellen Überflutungsbereiche keine Gefahr für die Planung oder Errichtung dar. Ihr Vorkommen und ihre Ausdehnung sowie ihre Auswirkungen in der Umgebung sollten aber für die Planung berücksichtigt werden. Allerdings könnte ein anderer Ausschlussgrund solcher Überflutungs- und Risikogebiete deren Bedeutung als Schutzgut nach UVPG (1990) sein.

Flüsse oder künstlich angelegte Wasserflächen oder Wasserwege werden wiederum als unproblematisch eingeschätzt. Vor allem Flüsse sind mit dem Grundwassersystem gekoppelt und beeinflussen dieses. Wie bereits im Kapitel über die „Hydrogeologie Norddeutschlands am Beispiel des Salzstocks Gorleben“ erläutert, sollte die Hydrogeologie eines Standortes genau erforscht werden, um mögliche Wegsamkeiten und Schwächezonen, die durch Subrosion am Salzstock entstehen konnten oder in Zukunft möglicherweise entstehen werden, eingrenzen zu können. Da aber nur die rezente Situation betrachtet und im ersten Verfahrensschritt keine Erkundung am Standort selbst durchgeführt wird, kann festgestellt werden, dass eine Wasserfläche oder ein Fluss die Planung, Errichtung und Einlagerung nicht ungünstig beeinflusst.

Raumplanerische Kriterien

Ballungszentren oder generell dicht besiedelte Gebiete (auch Industrieanlagen) sollten in ihrer unmittelbaren Umgebung als ungünstige Gebiete angesehen werden. Eine solche Region verfügt meist über ein untertägiges Versorgungsnetz (Stromversorgung, Abwasserkanal etc.) oder sogar über eine untertägige Infrastruktur (U-Bahn etc.). Die Akzeptanz in der Bevölkerung für einen solchen Standort ist ebenfalls gering anzusehen. Die Errichtung eines Endlagers ebenso wie der Transport von Endlagerbehältern ist in solchen Gebieten nicht unmöglich, aber erheblich erschwert.

Windkraftanlagen, ebenso wie Freileitungsmasten zur Stromverteilung stellen wegen ihrer tiefen Verankerung und der punktuellen Auflast auf den Untergrund Standorte dar, die ausgeschlossen werden sollten.

Ehemalige oder bestehende Untertageanlagen in Salzkörpern für Bergbau, Erdgasspeicherung oder ähnlichen Anlagen sollten in Hinblick auf Erfahrungen mit den Bergwerken Asse und Morsleben vermieden werden. Die Interessen und Sicherheitseinrichtungen für Bergwerke unterscheiden sich zu sehr von den Schutzzielen, welche für ein Endlager angestrebt werden.

Es gibt Salzstöcke, in deren unmittelbarer Umgebung Explorationsvorhaben geplant oder durchgeführt werden, da Salzstöcke geologische Fallenstrukturen für Erdöl- und Erdgas darstellen können. Eine Konkurrenz zu einem solchen Verfahren kann die Standortauswahl ebenfalls erschweren oder, je nach rechtlicher Lage und Fortschritt der Exploration, sogar unmöglich machen.

In der Tabelle der Anlage 1 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG 1990) ist unter Punkt 11.2 „Errichtung und Betrieb einer Anlage zur Sicherstellung oder zur Endlagerung radioaktiver Abfälle“ die Notwendigkeit einer Umweltverträglichkeitsprüfung für ein Endlager gesetzlich verankert. Zweck dieses Gesetzes ist laut § 1, dass die Auswirkungen bestimmter Vorhaben auf die Umwelt durch Umweltprüfungen ermittelt und bewertet werden. Nach § 2 des UVPG sollen somit mögliche mittelbare und unmittelbare Auswirkungen auf die Biosphäre, Kulturgüter und Sachgüter ermittelt, beschrieben und bewertet werden. Biosphäre, also die Lebewelt, ebenso wie Boden, Luft, Wasser, Klima und Landschaft sowie Kultur- und Sachgüter werden als „Schutzgüter“ deklariert (§ 2 Abs. 1 UVPG). Eine Vorprüfung im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung wird nach Anlage 2 des UVPG für folgende Standorte im Hinblick auf deren ökologische Empfindlichkeit und mit Hilfe bestimmter Kriterien durchgeführt:

- Nutzungskriterien: Bestehende Nutzung des Gebiets als Siedlungs- oder Erholungsfläche durch land-, forst- und fischereiwirtschaftliche Nutzungen, wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung
- Qualitätskriterien: Reichtum, Qualität und Regenerationsfähigkeit von Wasser, Boden, Natur und Landschaft des Gebietes
 - Schutzkriterien: Belastbarkeit der Schutzgüter unter besonderer Berücksichtigung folgender Gebiete:
 - Gebiete, die nach Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG 2009) als besonders schützenswert erachtet werden, wie z.B. Naturschutzgebiete, Nationalparke, Biosphärenreservate u. ä.
 - Gebiete, welche nach WHG (2009) als besonders schützenswert deklariert sind, wie Wasserschutzgebiete, Heilquellenschutzgebiete, Risiko- und Überschwemmungsgebiete.
 - Außerdem Gebiete, in denen die Umweltqualitätsnormen nach Vorschriften der Europäischen Union überschritten sind, Gebiete mit hoher Bevölkerungsdichte, verzeichnete Denkmäler, Denkmalensembles, Bodendenkmäler oder Gebiete, die von der jeweiligen Denkmalschutzbehörde als archäologisch bedeutende Landschaften eingestuft worden sind.

Der Grund hierfür ist der besondere Schutz bestimmter Gebiete sowie der Schutz und Erhalt der Biosphäre. Eine Erkundungskampagne, ebenso wie die Errichtung eines Endlagers, kann diesen gesetzlich verankerten Schutzzielen entgegenstehen.

Sonstige öffentliche Belange

Nach eigener Einschätzung werden die meisten öffentlichen Belange, die während des ersten Verfahrensschritts vorgebracht werden könnten, vor allem durch die raumplanerischen Kriterien bereits abgedeckt oder ergeben sich aus diesen. So entstehen in der Nähe von Naturschutzgebieten, Heilquellen oder Gebieten besonderer kultureller Bedeutung oft auch Tourismusgebiete, die durch ein Endlagerprojekt negativ beeinflusst werden könnten. Ein anderer Einwand könnte die Bedeutung bzw. die Gefährdung der Landwirtschaft in einer Region sein. Öffentliche Belange oder Einwände werden in unterschiedlicher Ausprägung an jedem Standort entstehen und sollten im Einzelfall im jeweiligen Gebiet nach ihrer Bedeutung für den möglichen Standort beurteilt werden.

3.3 Bedeutung der geologischen Sachverhalte für einen möglichen Endlagerstandort, Entwicklung von Kriterien

Die folgende Tabelle (Tab. 3) beschreibt die sicherheitsrelevanten Sachverhalte und welche Auswirkungen diese im Bereich des geplanten Endlagerbergwerks bzw. auf den ewG sowie auf die Umgebung des Salzstocks haben können. Allgemein gilt das Schutzziel des sicheren Einschlusses für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren und die Überlegung, welche Gegebenheiten am Standort und mögliche Ereignisse im Nachweiszeitraum diesen Schutz gefährden können. Des Weiteren muss ebenso die Kombination verschiedener Sachverhalte betrachtet werden, um zu klären, ob sich unterschiedliche Sachverhalte bei gleichzeitigem Auftreten eventuell verstärken oder abschwächen können.

Dieser Typ von Überlegungen entspricht dem Punkt 3 der in KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) vorgeschlagenen Methodik: „3.) Geowissenschaftliche und klimatische Langzeitprognose: Identifikation und Bewertung von Einwirkungen auf die Integrität der einschlusswirksamen geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren sowie der Prozesse, die zu Freisetzungen beziehungsweise zur Rückhaltung der Radionuklide führen können.“

So können allgemeine Schlussfolgerungen beschrieben werden, die sich aus den sicherheitsrelevanten Sachverhalten und deren Kombinationen ergeben. Es können außerdem Ausschluss- und Abwägungskriterien sowie Mindestanforderungen definiert werden. Die Ausschlusskriterien beschreiben Bedingungen, unter denen die Realisierung des Endlagerbergwerks nicht möglich ist. Die Mindestanforderungen definieren Sachverhalte, die

eingehalten werden müssen und können so mögliche Standortregionen weiter eingrenzen. Unter Abwägungskriterien werden diejenigen Gegebenheiten zusammengefasst, die in Bezug auf die Erreichung einer möglichst hohen Sicherheit angewendet werden, um letztendlich konkret Standorte für die Erkundung festlegen zu können.

Im AkEnd-Bericht sind diese Kriterien meist mit konkreten quantitativen Angaben verbunden. So sollen zum Beispiel laut AkEND (2002) Standorte aus dem Verfahren ausgeschlossen werden, bei denen eine großräumige geogene Hebung von mehr als 1 mm/Jahr stattfindet. Damit kann diese Aussage eher als Parameter angesehen werden, bildet in dieser Form aber kein allgemein gültiges Kriterium. Bei Anwendung des Parameters aus dem genannten Beispiel kann es passieren, dass möglicherweise geeignete Standorte aus dem Verfahren ausscheiden, obwohl die Integrität des ewG dadurch zu keiner Zeit gefährdet ist. Im Falle dieses Beispiels müsste eine Gefährdung durch eine Netto-Abtragsrate für jeden Standort gesondert untersucht und bewertet werden.

Konkrete Parameter bzw. eine quantitative Einschätzung werden später im Verfahren, beispielsweise zur Abwägung zwischen Standorten und als Maß zur Sicherheitsbewertung benötigt. Es ist allerdings nicht konkretisiert, wann genau solche Parameter festgelegt werden sollen. Werden Kriterien zu früh mit Parametern versehen (Beispiel AkEnd), so besteht, wie bereits erwähnt, die Gefahr, dass geeignete Standorte aus dem Verfahren ausscheiden. Werden Parameter sehr spät im Verfahren gewählt, so könnten die Parameter in der Art festgelegt werden, dass jeder verbliebene Standort diese auch erfüllen kann. Jeder Standort könnte theoretisch „passend“ gemacht werden. Ein solches Vorgehen könnte darüber hinaus ebenfalls zu einem Vertrauensverlust in die Verfahrensdurchführung führen. Über die Lösung dieser Problematik müsste im Vorfeld der Standortauswahl entschieden werden.

Eine Übersicht über die für die Sicherheitsfunktionen des zukünftigen Endlagerstandortes relevanten Sachverhalte, deren Auswirkungen auf den ewG und dessen Umgebung, deren Kombinationsmöglichkeiten und Auswirkungen bzw. Unsicherheiten stellt Tab. 3 dar. Mögliche geologische Mindestanforderungen und die Bedeutung in Bezug auf die Sicherheit, die sich aus diesen Sachverhalten ergeben können, sind zusammenfassend in Tab. 4 dargestellt. Die eigenen Überlegungen darin wurden in diesem Schritt auch mit den FEP (Features, Events, and Processes) aus der VSG (WOLF ET AL. 2012) verglichen.

Tab. 3: Übersicht über sicherheitsrelevante Sachverhalte am Standort, deren Bedeutung und die daraus entstehenden Schlussfolgerungen bzw. Kriterien

Gegebenheit am Standort	Direkte Auswirkung für das geplante Endlagerbergwerk	Auswirkung in der Umgebung des Endlagerstandortes	Einwirkung bei Kombination der Sachverhalte	Teil der Sicherheitsuntersuchung/ Abwägungskriterien/ Mindestanforderungen/ Ausschlusskriterien
Ausdehnung und Mächtigkeit des Salzstocks	Entscheidend für eine mögliche Realisierung des Endlagerbergwerks inkl. Sicherheitsabständen		Zusätzliche Schutzbarriere in Form des Salzgesteins über der Oberkante des ewG bei Gletscherüberfahung sowie bei Ablaugungsprozessen	Die horizontale Ausdehnung und Mächtigkeit des Salzstocks müssen die Realisierung des Endlagerbergwerks und dazugehöriger Sicherheitsabstände ermöglichen
Glazigene Rinnen	Mögliche Freilegung und Schädigung der Integrität bei erneuter Gletscherüberfahung	Abtragung von Deckgebirge und Salzkörper bis in mehrere 100 m Tiefen bei erneuter Gletscherüberfahung	Möglichkeit der Reaktivierung glazigener Rinnen und weitere Abtragung des Deckgebirges	FuE-Arbeit notwendig, um genaue Bildungsbedingungen und Abschätzung der Gefährdung für einen möglichen Standort durchführen zu können Mögliche Anzahl an Eiszeiten im Nachweiszeitraum darf nicht zur Freilegung des ewG führen, Erfüllung der Mindestanforderungen ist anhand der lokalen Gegebenheiten abzuleiten (Mächtigkeit und Art der Gesteinsüberdeckung, auch Salz oberhalb ewG)

				Bevorzugung von Standorten mit mächtigerer Überdeckung (über die Mindestanforderung hinaus)
Geothermiebohrungen, Kavernenspeicherung und Rohstoffgewinnung (Erdöl, Erdgas, Kalisalze etc.)	<p>Bei Hohlräumen untertage: Verstärkte Konvergenz innerhalb des Salzstocks</p> <p>Möglicherweise fehlende Integrität im ewG</p> <p>Mögliche erhöhte Konzentration von Kohlenwasserstoffen im Salinar</p>	<p>Depressionsstrukturen an der Geländeoberfläche in Folge der Konvergenz des Salinars bei unverfüllten Kavernen</p> <p>keine Unverritztheit des Salinar gegeben</p> <p>Keine Unversehrtheit des Deckgebirges durch Bergbautätigkeit, d.h. kein durchgehender GW-Nichtleiter</p>		<p>Eventuell Ausschluss von Salzstöcken, die für Kavernenspeicherung genutzt werden</p> <p>bzw. Definition eines ausreichenden Sicherheitsabstandes um verfüllte und verschlossene Salzkavernen/Hohlräume sowie um vorhandene Bohrungen</p> <p>Bevorzugung von unverritzten Standorten mit intaktem Deckgebirge</p>
Rezent aktive Störungszonen	<p>Durch die plastischen Eigenschaften von Salzgestein keine direkte Auswirkung im ewG</p>	<p>Auslösen eines erneuten Salzaufstiegs durch tektonische Vorgänge</p> <p>Wegsamkeiten für Fluide</p> <p>Mögliche Schädigung übertägiger Anlagen und der Infrastruktur über- und untertage (einschließlich der Schachtverschlüsse)</p>		<p>Erstellung einer aktuellen Übersicht der aktiven Störungszonen, auch in regionalen Maßstäben notwendig</p> <p>Ausschluss von Gebieten mit nachgewiesenen seismischen Ereignissen und/oder Fluidtransport im Zusammenhang mit rezent aktiven Störungszonen</p>

				Bevorzugung von Standorten ohne rezent aktive Störungszonen
Mögliche Entwicklungen am Standort	Direkte Auswirkung für das geplante Endlagerbergwerk	Auswirkung in der Umgebung des Endlagerstandortes	Einwirkung bei Kombination der Sachverhalte	Teil der Sicherheitsuntersuchung/ Abwägungskriterien/ Mindestanforderungen/ Ausschlusskriterien
Permafrost	Keine direkte Auswirkung auf den ewG	Mögliche Änderung der hydrologischen Gegebenheiten, Mögliche verstärkte Lösungsprozesse und Hutbildung	Mögliche Einwirkung des Permafrost bis zum ewG bei vorheriger Gletscherüberfahung und partieller Abtragung des Deckgebirges	Das Gefährdungspotential durch Permafrost in Kombination mit einer Gletscherüberfahung muss im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen während der gesamten Planungsphase beachtet werden
Vollständige Inlandvereisung, Möglichkeit der Schaffung glazigener Rinnen sowie kryogener Klüfte	Mögliche Freilegung und Schädigung (Integrität)	Höhere Erosionsrate durch die Gletscherüberfahung, eventuell verstärkte Subrosion am Salzstock, Schaffung glazialtektonisch bedingter Störungen (möglicher erneuter Salzstockaufstieg nach Gletscherrückzug), Wegsamkeiten in den Salzstock durch die Bildung kryogener Klüfte	Zusätzliche Barriere durch Tonschicht im Deckgebirge, Möglichkeit der Reaktivierung <i>Glazigener Rinnen</i> durch erneuten Gletschervorstoß und weitere Abtragung des Deckgebirges	FuE-Arbeit notwendig, um genaue Bildungsbedingungen und Abschätzung des Gefährdung für einen möglichen Standort durchführen zu können Mögliche Anzahl an Eiszeiten im Nachweiszeitraum darf nicht zur Freilegung des ewG führen, Erfüllung der Mindestanforderungen ist anhand der lokalen Gegebenheiten abzuleiten (Mächtigkeit Gesteinsüberdeckung mit Locker- bzw. Festgestein)

				Überdeckung des Salzstocks mit Festgestein stellt ein zusätzliche mechanische Schutzbarriere gegen Abtragung durch Gletschervorstoß dar
Änderung der tektonischen (und hydraulischen) Verhältnisse am Standort durch glazigene Prozesse	Keine direkte Auswirkung	Neue Wegsamkeiten bis hin zu einer Verbindung zwischen GW-Leiter und Salzstock, Mögliche Subrosion am Salzstock	Schichtverstellung und Lagerungsstörungen durch Änderung des Spannungsfeldes während und nach Rückzug des Gletschers Schädigung von Festgestein- oder Tonschichten durch die Ausbildung von glazigenen Rinnen Mögliche Wegsamkeiten im Salinar durch Vorhandensein von kryogenen Klüften	Mögliches Versagen der Barrierenintegrität durch kaltzeitliche Ereignisse muss im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen während der gesamten Planungsphase beachtet werden Überdeckung des Salzstocks mit Festgestein stellt ein zusätzliche mechanische Schutzbarriere gegen eine tiefreichende Bildung von Störungen (bis hin zum Salzstock) und somit auch von Wegsamkeiten durch einen Gletschervorstoß dar
Änderung der hydraulischen und chemischen Eigenschaften von Fließsystemen im Deckgebirge (nicht glazigen bedingt)	Keine direkte Auswirkung	Mögliche selektive Ablaugung am Salzstock durch zufließendes Grundwasser	Zusätzliche Barriere durch Tonschicht im Deckgebirge: Vermeidung von selektiver Ablaugung am Salzstock, längere Laufzeiten bei einer Nuklidfreisetzung	Bevorzugung von Standorten mit intakter Tonsteinschicht im überlagernden Gebirge Bevorzugung von Standorten mit Ausbildung einer stabilen salinar gesättigten und einer überlagernden ungesättigten Schichtung (Hinweis auf Fehlen von verstärktem Zustrom von ungesättigtem Grundwasser)

Seismische Aktivität	Keine direkte Auswirkung	Mögliche Auflockerungs- und Störungszonen im Deckgebirge je nach Seismizität des Zielgebietes, Beschädigung oder Zerstörung übertägiger Anlagen		Ausschluss von Gebieten, bei denen ein erhöhtes Erdbebenrisiko anzunehmen ist, um eine Unversehrtheit der übertägigen Anlagen zu gewährleisten und Brüche im Deckgebirge zu vermeiden Festlegung eines Sicherheitssaum um diese Gebiete
Vulkanische Aktivität	Gefahr der Beeinträchtigung des ewG durch aufsteigendes Magma (und Freisetzung vulkanischer Gase)	Mögliche Zerstörung übertägiger Anlagen		Ausschluss von Gebieten in denen vulkanische Aktivität rezent vorhanden und/oder im Nachweiszeitraum vermutet wird Festlegung eines Sicherheitssaums um diese Gebiete
Großräumige, nicht glazial bedingte Vertikalbewegung, Erosion, Subrosion (bei gemäßigten Klimaten)	Mögliche Freilegung und Schädigung des ewG	Verstärkte Erosion des Deckgebirges (und der möglicherweise vorhandenen Festgesteinseinheiten)	Mögliche Verstärkung der rezent herrschenden Vertikalbewegung	Der ewG darf durch Netto-Abtragungsrate nicht freigelegt und seine Integrität durch Hebung, Senkung etc. nicht gefährdet werden

3.4 Zur repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung im ersten Verfahrensschritt

Das STANDAG fordert in jedem zu erfüllenden Verfahrensschritt eine Sicherheitsuntersuchung. Eine Sicherheitsanalyse im eigentlichen Sinn ist standortbezogen, d.h. dass ein detaillierter Datensatz (auf der Grundlage von 2D-Seismik, 3D-Seismik, Bohrungen, ggf. Erkundung untertage etc.) über den Standort und ein zu Grunde liegendes Sicherheits- und Nachweiskonzept sowie ein Konzept des geplanten Bergwerks (Endlagerkonzept) vorhanden sein müssen. So können auf Basis dieser Daten Modelle erstellt werden, die konkrete Aussagen über die Sicherheit, die erreicht werden kann, bzw. über Sicherheits- oder Kenntnislücken, an denen geforscht werden muss, wiedergeben können. Im Ergebnis solcher Modellierungen sowie jeder Kenntnisk Gewinn kann zur Änderung oder zum Verwerfen des bis dahin geplanten Konzepts führen.

Nach dem ersten Verfahrensschritt besteht allerdings das Problem der Datenlage. Konkrete Daten und Ergebnisse aus Erkundungen und Messungen ergeben sich erst im weiteren Verlauf der Standorterkundung. Auch die Entwicklung von Szenarien kann in dieser Phase nur sehr allgemein für Salz als Wirtsgestein durchgeführt werden. Es stellen sich also die Fragen, was nach dem ersten Verfahrensschritt unter einer Sicherheitsuntersuchung verstanden werden soll bzw. welche Inhalte darin aufgegriffen werden können.

Die Inhalte, die nach KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) Teil einer Sicherheitsuntersuchung sein sollen, wurden bereits im Kapitel 2.5.2 erläutert und sollen hier noch einmal für die repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung aufgegriffen werden.

1. Erstellung eines Sicherheits- und Nachweiskonzepts

Laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) soll ein Sicherheitskonzept von den übergeordneten Funktionen „Einschluss“ und „Integrität“ ausgehen und muss für die jeweilige geologische Situation angepasst werden. Grundlegend ist dabei die Zuordnung der Sicherheitsfunktionen zu den einzelnen Komponenten der Geologie und denen des Endlagerbergwerks. Die Kommission weist in ihrem Abschlussbericht darauf hin, dass bei der Entwicklung der Sicherheits- und Nachweiskonzepte auf bereits bestehende, u. U. auch im Ausland entwickelte Konzepte zurückgegriffen werden kann, solange diese dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016). Diese sollen dann im Laufe des Verfahrens weiterentwickelt werden. Ein bestehendes Sicherheits- und Nachweiskonzept, inklusive der Zuordnung von

Sicherheitsfunktionen, wurde in der VSG für Salz in steiler Lagerung dargelegt. Da diese die gesamte Erkundung, die für den Salzstock Gorleben durchgeführt wurde umfasst, ist sie weitaus umfangreicher und detaillierter, als für diesen Verfahrensschritt benötigt. Sie kann also als ausreichende Grundlage für die Konzeptentwicklung angesehen werden.

2. Erstellung eines (vorläufigen) Endlagerkonzepts

Die KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) schlägt hierbei vor, dass mindestens ein Endlagerkonzept pro Wirtsgestein entwickelt werden soll. Wenn möglich sollen mehrere Konzepte je Standortregion entwickelt werden, um eine bessere Vergleichsmöglichkeit bieten zu können. Es ist allerdings unklar, ob nach dem ersten Verfahrensschritt bereits eine Entscheidung für ein mögliches Einlagerungskonzept getroffen werden kann. Die unterschiedlichen Einlagerungskonzepte (inkl. Behälterkonzept, Einlagerungstechnik, Sicherheitsabstände, etc.) für das Wirtsgestein Salz wurden in der VSG dargelegt und diskutiert und können für zukünftige Auswahlverfahren als Grundlage genommen werden. Die Standortauswahl und die Konzeptentscheidung laufen im Verfahren parallel, das Konzept muss aber zu einem bestimmten Zeitpunkt auch im Hinblick auf die Machbarkeit einer Sicherheitsbewertung festgelegt werden. Der Zeitpunkt dieser Festlegung bestimmt, wie lange eine Flexibilität beim Lagerungskonzept beibehalten werden soll. Die Anforderungen an eine vorkommende Salzstruktur sind bei den jeweiligen Lagerungstechniken, v. a. in Hinblick auf die räumliche Ausdehnung des Bergwerks, unterschiedlich. Abb. 20 zeigt schematisch Strecken- und Bohrlochlagerung⁵.

⁵ Als Dummy-Behälter werden unbefüllte Behälter bezeichnet, welche im Bohrloch als Platzhalter dienen.

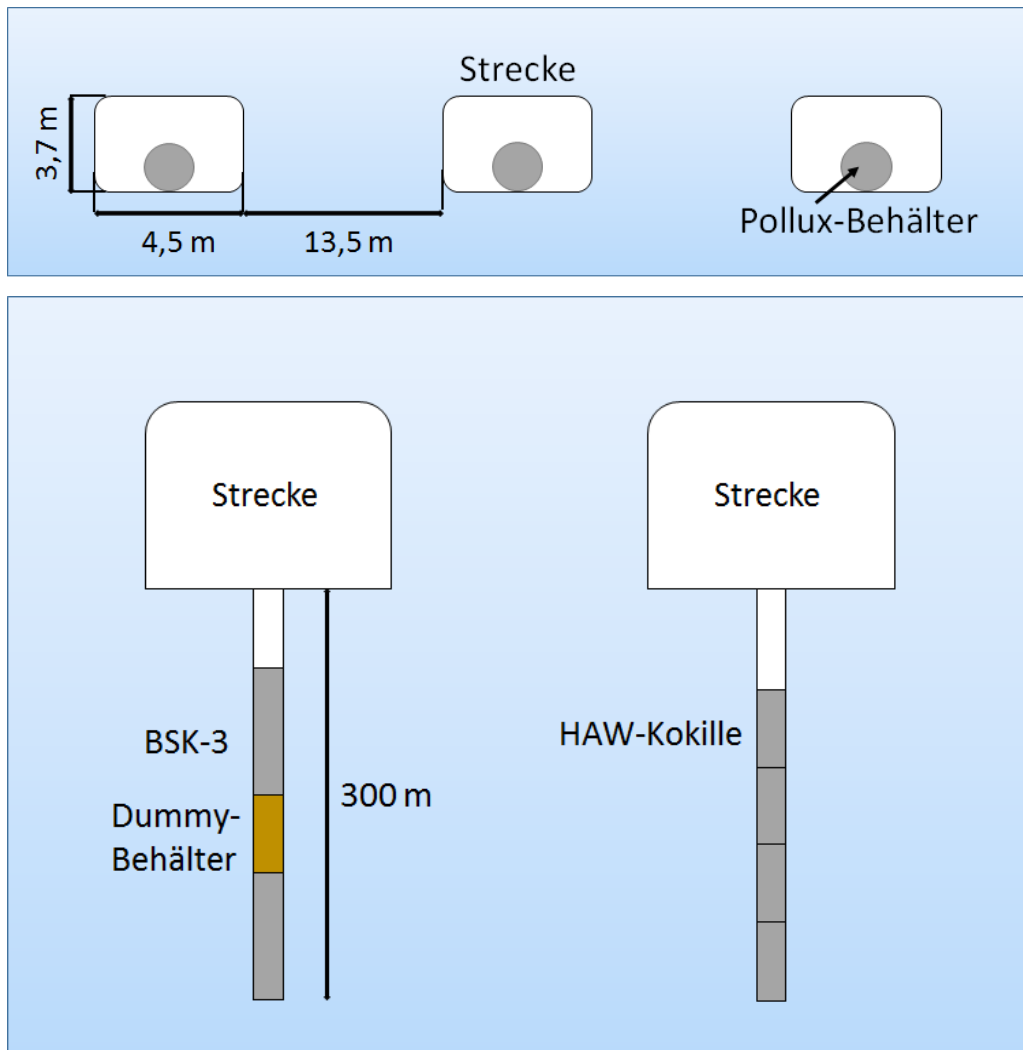


Abb. 20: Schematische Darstellung von Streckenlagerung (oben) und Bohrlochlagerung (unten) im Steinsalz (nach WÜSTE ET AL. 2010).

Daraus ergeben sich im ersten Verfahrensschritt für die Auswahl eines geeigneten Salzstocks folgende Varianten:

- Ein Salzstock muss sowohl die Anforderungen für die Strecken- sowie für die Bohrlochlagerung erfüllen.
- Ein Salzstock muss die Anforderung für nur eine vorher definierte Einlagerungstechnik erfüllen.

Die Problematik bei der ersten Variante ist das Auffinden eines Salzstocks, der tatsächlich alle Mindestanforderungen für beide Einlagerungstechniken erfüllt. Ein solcher Salzstock müsste sowohl über eine ausreichende vertikale wie auch horizontale Ausdehnung inklusive der Sicherheitsabstände im Steinsalz kern verfügen. Bei der zweiten Variante muss ein Salzstock die Anforderungen für nur eine Einlagerungstechnik erfüllen. Die Einlagerungstechnik (Bohrloch- oder Streckenlagerung) ist damit bereits vorgegeben. Die darauf folgenden Verfahrensschritte

orientieren sich an diesem Konzept und können davon möglicherweise nicht mehr abweichen. Als Vorschlag soll hier eine dritte Variante genannt werden:

- Ein Salzstock muss die Anforderungen für mindestens eine der beiden Einlagerungstechniken erfüllen. Wenn ein Salzstock mehr als eine Lagerungsvariante erfüllen kann, ist der Standort im Rahmen einer Abwägung als besser einzuschätzen.

Hierbei soll angemerkt werden, dass sich die vorangegangene Argumentation zum Zeitpunkt der Entscheidung für ein Einlagerungskonzept auf rein geologische Aspekte bezieht. Dies wird auch bei den diesbezüglichen Einschätzungen für die folgenden Verfahrensschritte gelten. Allerdings können auch andere, nicht-geologische Gründe zu einer frühzeitigen Entscheidung führen. Beispielsweise wird die Entscheidung zur Verpackung der Abfälle nicht erst bei Einlagerung, sondern zu einem sehr viel früheren Zeitpunkt erfolgen müssen (ESK 2016a). Vor allem im Fall der Brennelemente wird bei längerer Zwischenlagerzeit von einer Zersetzung des Hüllrohres ausgegangen. Je eher also ein Behälterkonzept gewählt wird, desto einfacher wird die Handhabung der BE bei der Umverpackung aus den Zwischenlager- und Transportbehältern (CASTOR®-Behälter) in die Endlagerbehälter fallen. Spätestens in der Genehmigungsphase für einen Standort müssen das Einlagerungskonzept sowie die dafür genehmigungsfähigen Behälter feststehen. Ebenso können Beschlüsse, wie beispielsweise die Rückholbarkeit, bestimmte Konzepte verwerfen oder sie zumindest in ihren Grundlagen verändern. Auch eine solche Entwicklung kann eine sehr viel frühere Entscheidung in Richtung eines Konzepts erzwingen.

3. *Geowissenschaftliche und klimatische Langzeitprognose und*
4. *Wahrscheinlichkeit möglicher Freisetzungseignisse*

Beide Punkte sind im Abschlussbericht der Kommission nicht klar voneinander getrennt bzw. gehen ineinander über. Da im ersten Verfahrensschritt aus Mangel an Daten generell noch keine Freisetzungsrechnungen im eigentlichen Sinn durchgeführt werden können, werden hier beide Aspekte gemeinsam betrachtet. Mit den vorhandenen Informationen kann eine geologische sowie klimatische Langzeitprognose angefertigt werden. Für die VSG wurde durch MRUGALLA (2011) eine solche Prognose sehr detailliert erstellt. Im ersten Verfahrensschritt sollen so diejenigen Salzstöcke aus dem Verfahren genommen werden, die in Bezug auf Sicherheit, sowohl während des Auffahrens, des Betriebes oder während des Zeitraums von einer Million Jahre, nicht in Frage kommen. Grundsätzlich kann festgestellt werden:

- Die Freilegung des ewG und somit eine Schädigung seiner Integrität und/oder seines Einschlussvermögens innerhalb des vorgesehenen Zeitraums von einer Million Jahren muss ausgeschlossen sein.

Der Fokus der Betrachtungen liegt somit auf den Erhalt des Einschlusses und der Integrität im Einlagerungsbereich. Eine Einschätzung zur Wahrscheinlichkeit von Freisetzungseignissen kann also auf diese Einschluss- und Integritätsbetrachtungen Bezug nehmen. Für das Wirtsgestein Steinsalz bildet der homogene und ungestörte Salzkern die Grundvoraussetzung für einen sicheren Einschluss.

Eine Übersicht über relevante Gegebenheiten oder Entwicklungen an einem möglichen Standort und deren Bedeutung für die Sicherheitsuntersuchung gibt Tab. 4. In der Tabelle fällt auf, dass sich bestimmte Kriterien (z.B. Abwägungskriterium Mächtigkeit überlagernde Gesteinseinheiten) bei mehreren Sachverhalten wiederholen. Das zeigt, dass dem jeweiligen Kriterium bei mehreren Entwicklungsmöglichkeiten eine sicherheitsrelevante bzw. den ewG schützende Bedeutung zukommt. Die Abwägungskriterien sollen, wie bereits erwähnt, bei der Auswahl eines zu erkundenden Salzstocks unter mehreren möglichen Standortregionen helfen. Hierbei soll darauf hingewiesen werden, dass nicht unbedingt eine besondere Reihenfolge oder Gewichtung entscheidend ist, sondern eine Auswahl im Hinblick auf einen Sicherheitsgewinn getroffen werden sollte.

5. Ungewissheiten und Sicherheitsreserven

6. Erkundungs- und FuE-Bedarf, Optimierungsmöglichkeiten

Einschätzungen bezüglich der Punkte 5 und 6 finden sich in Tab. 5. Im darauffolgenden Kapitel 3.4.1 bezüglich der Erhebungsmöglichkeiten im ersten Verfahrensschritt und einer Einschätzung der Datendichte wird in manchen Punkten ebenfalls ein Erkundungsbedarf deutlich.

Tab. 4: Übersicht über die im ersten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte und deren Bedeutung in der Sicherheitsuntersuchung

Gegebenheit am Standort	Sicherheitsuntersuchung
Ausdehnung und Mächtigkeit des Salzstocks	<p>Eine möglichst große räumliche Ausdehnung des Salzstocks, sowohl horizontal als auch vertikal, kann zusätzlichen Schutz gegen Freilegung des ewG bieten. Salz ist ein Festgestein und somit widerstandsfähig gegenüber der Abtragung bei einer Gletscherüberfahrung. Darüber hinaus bietet eine größere Mächtigkeit der Salzbarriere über der Oberkante des ewG auch einen größeren Schutz gegen Ablaugsprozesse.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Abschätzung der Mächtigkeit und der Ausdehnung des Salzstocks für jeden Standort notwendig → Abwägung: Je mehr Salzgestein über der Oberkante des ewG vorhanden ist, desto besser
Bestehende Glazigene Rinnen und Kryogene Klüfte	<p>Eine negative Beeinflussung des ewG, bis hin zur Freilegung oder zur Bildung von Wegsamkeiten durch kaltzeitliche Ereignisse, kann durch ausreichende Überdeckung verhindert werden. Eine Überdeckung durch Locker- oder Festgestein stellt eine zusätzliche Schutzbarriere dar: Abtragung von nur 30-50 m Festgestein (auch Salz) bei Gletschervorstoß im Gegensatz von ~200 m bei Lockergesteinsüberdeckung.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Abschätzung für jeden Standort nötig: Gegebenheiten/ kaltzeitliche Ereignisse können zum Ausschluss führen durch die Gefahr der Freilegung oder Bildung von Wegsamkeiten. Es muss darüber hinaus von der Möglichkeit unentdeckter Kryogener Klüfte ausgegangen werden → Abwägung: je mehr Überdeckung am Standort, desto besser. Hierzu zählt auch Salz oberhalb des ewG

<p>Geothermiebohrungen, Kavernenspeicherung und Rohstoffgewinnung</p>	<p>Vermeidung von möglichen künstlich geschaffenen Wegsamkeiten und erhöhten Bewegungsraten innerhalb des Salzstocks oder Verbrüchen durch bereits bestehende bzw. andauernde Bergbautätigkeit.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Abschätzung der Gefährdung durch bergbauliche Tätigkeiten, evtl. bei fehlendem Platzangebot (Salzkern oder Sicherheitszonen nicht möglich) Ausschluss notwendig → Abwägung: unverritzter Standort ist zu bevorzugen
<p>Rezent aktive Störungszonen</p>	<p>Vermeidung der Gefahr von Störungen, Brüchen oder Wegsamkeiten im Salzstock bzw. im ewG, die durch eine aktive Störungszone ausgelöst werden können.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Erstellung einer aktuellen Übersicht der aktiven Störungszonen notwendig → Abschätzung der Gefahr für jeden Standort im Falle zutretender Fluide, Bewegungen an Störungen etc. → Abwägung: Standort außerhalb aktiver Störungsbereiche ist zu bevorzugen
<p>Mögliche Entwicklungen am Standort</p>	<p>Sicherheitsuntersuchung</p>
<p>Kalt-/ Eiszeitliche Ereignisse: Permafrost und Vollständige Inlandvereisung, Möglichkeit der Schaffung Glazigener Rinnen sowie Kryogener Klüfte</p>	<p>Eine negative Beeinflussung des ewG, bis hin zur Freilegung oder zur Bildung von Wegsamkeiten durch kaltzeitliche Ereignisse, kann durch ausreichende Überdeckung verhindert werden. Eine Überdeckung durch Locker- oder Festgestein stellt eine zusätzliche Schutzbarriere dar.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Abschätzung für jeden Standort nötig: Gegebenheiten/ kaltzeitliche Ereignisse können durch die Gefahr der Freilegung zum Ausschluss führen → Abwägung: je mehr Überdeckung am Standort, desto besser

Änderung der tektonischen (und hydraulischen) Verhältnisse am Standort durch glazigene Prozesse	<p>Durch Überdeckung mit GW-Nichtleitern (Tonschichten) kann eine Bildung von Wegsamkeiten zum Salzstock verhindert werden. Änderungen der Gegebenheiten während der nächsten Kaltzeiten sind möglich.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Abschätzung der Barrierenwirkung des Deckgebirges gegenüber kaltzeitlichen Ereignissen an jedem Standort notwendig → Abwägung: je mehr Überdeckung am Standort, desto besser, um glazigen ausgelöste Störungen und Brüche (und Wegsamkeiten) bis hin zum Salzstock zu vermeiden.
Änderung der hydraulischen und chemischen Eigenschaften von Fließsystemen im Deckgebirge (nicht glazigen bedingt)	<p>Überdeckung mit durchgehenden GW-Nichtleiter kann eine Subrosion verhindern.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Abschätzung der geologischen Gegebenheiten im Deckgebirge für jeden Standort notwendig → Abwägung zugunsten von Standorten mit ausgebildeter Salz-/ Süßwasserschichtung und Vorhandensein von GW-Nichtleitern
Seismische Aktivität	<p>Ausschluss von seismisch und vulkanisch aktiven Gebieten, inklusive „Sicherheitszone“. Dadurch Gewährleistung eines seismisch ruhigen Standortes und Unversehrtheit des ewG durch seismisch induzierte Brüche oder Störungen, sowie durch vulkanische Intrusion.</p>
Vulkanische Aktivität	
Großräumige, nicht glazial bedingte Vertikalbewegung, Erosion, Subrosion (bei gemäßigten Klimaten)	<p>Vermeidung einer Freilegung/Schädigung des ewG durch Betrachtung der Netto-Abtragungsrate. Zusätzliche Sicherheit durch durchgehende GW-Nichtleiter.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Abschätzung der Netto-Abtragungsrate und damit verbundenen Gefahr von Freilegung und Schädigung ist für jeden Standort notwendig → Ausschluss von Standorten bei möglicher Freilegung des ewG → Abwägung: Standorte mit wenig oder fehlender Bewegung bzw. geringerer Netto-Abtragungsrate sind zu bevorzugen.

Tab. 5: Übersicht über die im ersten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte, die diesbezüglich bestehenden Ungewissheiten, Sicherheitsreserven, den Erkundungs- und FuE-Bedarf sowie mögliche Optimierungsmöglichkeiten

Gegebenheit am Standort	Ungewissheiten	Erkundungs- und FuE-Bedarf	Optimierungsmöglichkeiten und Sicherheitsreserven
Ausdehnung und Mächtigkeit des Salzstocks	Ungewissheiten resultieren in dieser Phase des Verfahrens aus der Qualität und der Verlässlichkeit des Datensatzes. V.a. die Auswertung seismischer Messungen unterliegt einem Interpretationsspielraum.	Um eine verlässliche Aussage zu Mächtigkeit und Ausdehnung treffen zu können, sind die nachfolgenden Erkundungsschritte unerlässlich, v.a. seismische Messungen (v.a. 3D-Seismik) sowie Bohrungen im Umfeld des Salzstocks. Zudem sollten Datensätze und Karten mit Hilfe durchgeführter Erkundungsprogramme auf den neuesten Stand gebracht werden.	Die Erkundungsmethoden unterliegen konstanter Entwicklung und somit auch einer Optimierung bezüglich ihrer Genauigkeit. Ungenauigkeiten im Rahmen der Auswertung v.a. der seismischen Messungen, kann durch Sicherheitsaufschläge (z.B. Mächtigkeit Barriere zum Nebengebirge) Rechnung getragen werden.
Bestehende Glazigene Rinnen und Kryogene Klüfte	Die Lokation und Tiefe von Glazigenen Rinnen ist bekannt. Kryogene Klüfte werden jedoch erst durch Bohrungen entdeckt. Es sollte generell mit dem Vorhandensein Kryogener Klüfte in Bereichen, welche kalt-bzw. eiszeitlichen Bedingungen unterlagen, gerechnet werden.	Für beide Gegebenheiten ist FuE-Bedarf zur genauen Entstehung nötig, um eine Gefährdung für den jeweiligen Standort abschätzen zu können. Die Erkundung von Kryogenen Klüften kann nur am jeweiligen Standort durch Bohrungen durchgeführt werden und selbst dann kann die Kluft auch verfehlt werden und unentdeckt bleiben. Gegebenenfalls kann eine solche Kluft durch seismische Messverfahren, v.a. wenn sie durch nicht-salinare Gesteine verfüllt ist, kartiert werden.	Da die Bildungsbedingungen für beide Gegebenheiten noch nicht genau verstanden sind, muss in beiden Fällen eine Sicherheitsreserve diesbezüglich einberechnet werden (Mindestanforderungen bzgl. ausreichender Überdeckung des ewG zur Vermeidung von Schädigungen).

Geothermiebohrungen, Kavernenspeicherung und Rohstoffgewinnung	Die Lage und der Umfang der genannten Bohrungen und Abbaue sollte in detaillierter Form vorliegen, da auch hierfür Genehmigungsverfahren durchlaufen werden.	Die nötigen Informationen können bei der durchführenden Organisation bzw. der Genehmigungsbehörde eingeholt werden.	Da Bohrungen, Kavernen und Abbaue Schwächezonen darstellen, müssen Sicherheitsreserven eingeplant werden, sollte das Endlagerbergwerk im gleichen Salzstock geplant werden. Es müssen Sicherheitsabstände bei übertägigen Abbauen eingehalten werden, um eine Freilegung des ewG zu verhindern.
Rezent aktive Störungszonen	Es existieren Karten über rezent aktive Störungszonen. Allerdings ist ihr Detailgrad abhängig von den lokal durchgeführten Untersuchungen bzw. bestehen auch hier Interpretationsspielräume. Bei seismischen Auswertungen können je nach Auflösung Störungen übersehen werden.	Für die jeweilige Standortregion ist eine Übersicht über die relevanten Störungen zu erstellen. Die Einteilung in aktive oder inaktive Störungen ist zu ergänzen (Bohrungen, seismische Messungen, Fluidtransport, etc.)	Ungenauigkeiten im Rahmen der Auswertung v.a. der seismischen Messungen, kann durch Sicherheitsaufschläge (z.B. Mächtigkeit Barriere zum Deck- und Nebengebirge) Rechnung getragen werden.
Mögliche Entwicklungen am Standort	Ungewissheiten	Erkundungs- und FuE-Bedarf	Optimierungsmöglichkeiten und Sicherheitsreserven
Kalt-/ Eiszeitliche Ereignisse: Permafrost und Vollständige Inlandvereisung, Möglichkeit der Schaffung Glazigener Rinnen sowie Kryogener Klüfte	Kalt-/ Eiszeitliche Ereignisse folgen in ihrem Auftreten zyklischer Wiederholung. Es kann vorhergesagt werden, dass solche Ereignisse im Nachweiszeitraum stattfinden werden, aber eine Aussage über ein explizites Eintreten oder eine genaue Anzahl ist nicht möglich.	Die Entwicklung kalt- oder eiszeitlicher Ereignisse findet in Zeiträumen statt, die unsere Möglichkeiten zur Erkundung oder FuE ebenso wie zur Entwicklung von Optimierungen übersteigen. Es wäre zu empfehlen, dass sich Quartärgeologen, Glaziologen und Klimaforscher zum Thema Kalt- und Eiszeiten sowie deren	Es ist es im Hinblick auf eine unbedingte Vermeidung der Freilegung des ewG möglich, eher konservative Annahmen zu treffen und die Sicherheitsreserven (v.a. Überdeckung mit Festgestein) daran dementsprechend zu orientieren. Die Ableitung von Kriterien und die Einschätzung im Rahmen einer Sicherheitsanalyse müssen für nur

		Begleiterscheinungen verständigen, um so eventuell verlässlichere Aussagen ableiten zu können.	ungenau vorhersagbare Einwirkungen konservativ erfolgen.
Änderung der tektonischen (und hydraulischen) Verhältnisse am Standort durch glazigene Prozesse	Die Ausprägung einer Kalt- oder Eiszeit und ihrer Begleiterscheinungen kann nur sehr ungenau abgeschätzt werden.	Die Entwicklung kalt- oder eiszeitlicher Ereignisse findet in Zeiträumen statt, die unsere Möglichkeiten zur Erkundung oder FuE übersteigen.	Über die Auslegung der Sicherheitsreserven, z.B. der Mächtigkeit der Überdeckung (ebenso Vorhandensein eines GW-Nichtleiters) kann auf mögliche Änderungen reagiert werden.
Änderung der hydraulischen und chemischen Eigenschaften von Fließsystemen im Deckgebirge (nicht glazigen bedingt)	Eine Vorhersage über die Ausbildung der hydraulischen und chemischen Gegebenheiten im Deckgebirge über den gesamten Nachweiszeitraum ist nahezu unmöglich.	Das Fließsystem im Deckgebirge kann durch viele Faktoren verändert werden, auch kleinräumig durch menschliche Einflussnahme. Großräumige und langfristige Veränderungen werden durch v.a. Eis- und Kaltzeiten eintreten. Es wäre zu empfehlen, dass sich Quartärgeologen, Glaziologen und Klimaforscher zum Thema Kalt- und Eiszeiten sowie deren Begleiterscheinungen verständigen, um so eventuell verlässlichere Aussagen treffen zu können. Eine Aussage zur momentanen Situation kann durch Bohrungen in der übertägigen Erkundung getroffen werden.	Eine Abwägung zugunsten eines GW-Nichtleiters im Deckgebirge und einer ausgebildeten Salz-/ Süßwasserschichtung sind mögliche Sicherheitsbarrieren, welche in dieser Form nur bis zur nächsten Kalt- oder Eiszeit Bestand haben. Die Ableitung von Kriterien und die Einschätzung im Rahmen einer Sicherheitsanalyse müssen für nur ungenau vorhersagbare Einwirkungen konservativ erfolgen.
Seismische Aktivität	Die seismische Aktivität am Standort ist eng verknüpft mit der	Die grundsätzlichen Vorgänge bei Erdbeben oder Vulkanausbrüchen	Die Überwachungsmethoden für seismische Ereignisse und

	tektonischen und vulkanischen Situation. Durch vergangene Messungen der seismischen Aktivität können seismisch aktive Gebiete eingegrenzt werden. Eine Aussage über das zeitlich genau Eintreten oder die Stärke von Erdbeben ist nur sehr ungenau möglich.	und damit in Zusammenhang stehenden Auswirkungen sind bekannt und werden grundsätzlich verstanden. Trotzdem können keine konkreten Aussagen zum Eintreten und der Intensität gemacht werden. Es können nur Begleiterscheinungen (z.B. lokale Hebungsraten, Gasaustritte, seismische Ereignisse unterschiedlicher Intensität) beobachtet werden.	Begleiterscheinungen von vulkanischer Aktivität unterliegen konstanter Entwicklung und somit auch einer Optimierung bezüglich ihrer Genauigkeit. Es können Sicherheitsbereiche um bekannte seismisch oder vulkanisch aktive Gebiete (ebenfalls vermutet im Nachweiszeitraum) eingerichtet werden.
Vulkanische Aktivität	Es können vulkanisch aktive, ruhende und inaktive Gebiete abgegrenzt werden. Ebenso können Vorhersagen über vulkanische Ereignisse gemacht werden, oft anhand vergangener Ereignisse und Beobachtungen. Das Eintreten vulkanischer Aktivität ist in manchen Fällen zyklisch. So können Einschätzungen über das vermutete Eintreten vulkanischer Ereignisse im Nachweiszeitraum gemacht werden. Genauere Angaben diesbezüglich sind nicht möglich.		
Großräumige, nicht glazial bedingte Vertikalbewegung, Erosion, Subrosion (bei gemäßigten Klimaten)	Durch konstante Beobachtungen und Messungen sind diese Gegebenheiten bekannt bzw. können mit großer Sicherheit abgeschätzt werden. Allerdings ist während und nach einer Eiszeit mit Veränderungen zu rechnen.	Die grundsätzlichen Vorgänge sind bekannt und werden verstanden. Es können Erfahrungen und Daten aus vereisten und eisnahen Gebieten zur Grundlage über eine post-glaziale Phase Aussage zu Vertikalbewegung, Erosion und Subrosion genutzt werden.	Sicherheitsbarrieren bzw. -reserven müssen an die Netto-Abtragungsrate und einer möglichen Gefahr der Freilegung und Schädigung des ewG angepasst werden.

3.4.1 Erhebungsmöglichkeiten im ersten Verfahrensschritt

Die Erhebungsmöglichkeiten für die Sicherheitsaussagen beschränken sich im ersten Schritt des StandAG auf das Studium von Karten, Berichten und Internetrecherche. Eine wichtige Grundlage liefert dabei die VSG sowie alle anderen Gutachten und Berichte, welche im Rahmen der Erkundung des Salzstocks Gorleben vorgenommen wurden. Einige der Aussagen und Untersuchungen, v. a. in Hinblick auf die geologischen Gegebenheiten, sind nicht nur für die Region um den Standort Gorleben, sondern für ganz Norddeutschland anwendbar (Entwicklungen während Kaltzeiten, vulkanische Aktivität, seismische Ereignisse etc.). Zu allgemeinen geologischen Themen gibt es auch eine Anzahl anderer wissenschaftlicher Arbeiten, die aber meist weniger detaillierte und großräumigere Informationen liefern.

Es besteht Forschungsbedarf bei glazial bedingter Erosion und Subrosion, Rissbildungen (Beispiel: Kryogene Klüfte) und der Bildung tiefer Rinnen während Eiszeiten. Eine wichtige Grundlage stellt in diesem Zusammenhang die BGR-Karte der Salzstrukturen Norddeutschlands (REINHOLD ET AL. 2008) dar, ebenso wie die Rohstoffberichte der BGR (für das Jahr 2012: HUY ET AL. 2013). Auskunft über Schutzgebiete, Gebiete mit Altlasten, geologische Profilabdeckung, Profilschnitte, Bohrungen, Bergbau und weitere Informationen bietet der NIBIS® Kartenserver des LBEG, allerdings bisher im Detail nur für das Land Niedersachsen. Ein Ausbau dieser Informationsplattform für die anderen norddeutschen Bundesländer sollte zukunftsnahe in Betracht gezogen werden. Ebenso sollte für die Aufgabe der Auswahl des Standortes mit der größtmöglichen Sicherheit der Grundsatz der Offenlegung aller dafür relevanten Informationen möglich sein. Dazu gehören u. a. 2D- oder 3D-Seismik gegenwärtiger Explorationsgebiete, da diese annähernd flächendeckend in Norddeutschland existieren und eine wichtige Informationsquelle für Strukturen und Störungen im Untergrund darstellen. Weitere Informationen mittels Fernerkundung, z.B. die Auswertung von Satellitenbildern sind ohne zusätzliche Erkundung am Ort nicht ausreichend für eine umfassende Bewertung des Standortes. Sie können aber bei der übertägigen oder untertägigen Erkundung hilfreich sein.

Erhebungsmöglichkeiten bzw. Informationen zur bestehenden Datenlage orientiert an den sicherheitsrelevanten Sachverhalten sind zusammenfassend in Tab. 6 dargestellt.

Tab. 6: Übersicht über die Datenlage der sicherheitsrelevanten Sachverhalte

Sachverhalt	Erhebungsmöglichkeit/ Detailgrad der Datenlage
Ausdehnung und Mächtigkeit des Salzstocks	Die Datenlage diesbezüglich variiert, je nachdem ob der jeweilige Salzstock bereits Ziel von Exploration (z.B. Erdöl-/ Erdgas-Exploration, Geothermische Erkundungsbohrungen) gewesen ist. Es sind grundsätzliche Informationen zu Ausdehnung (REINHOLD ET AL. 2008) und Mächtigkeit (NIBIS® Kartenserver) vorhanden.
Glazigene Rinnen	Es sind geologische Karten zur Quartärbasis und somit zur Lokation und Ausdehnung von Glazigenen Rinnen vorhanden (z.B. Abb. 8, MRUGALLA 2011)
Geothermiebohrungen, Kavernenspeicherung und Rohstoffgewinnung	Die Datenlage ist grundsätzlich sehr detailliert, aber in den meisten Fällen nicht öffentlich zugänglich. Einen Überblick über Bohrungen bietet der NIBIS® Kartenserver. Detaillierte Informationen befinden sich bei den jeweils ausführenden Firmen.
Rezent aktive Störungszonen	Das vorherrschende Spannungsregime ist großräumig durchaus bekannt und dokumentiert (BOETTICHER ET AL. 2011). Störungen im Untergrund werden v.a. durch seismische Messverfahren detektiert. Die Genauigkeit hängt hierbei von der Auflösung der seismischen Messung ab.
Permafrost und eiszeitliche Ereignisse	Kalt- und eiszeitliche Ereignisse treten in zyklischen Zeitabständen auf, aber eine genaue Vorhersage zu Beginn, Dauer und Ausprägung ist nicht möglich. Es wäre allerdings zu empfehlen, dass sich Quartärgeologen, Glaziologen und Klimaforscher zum Thema Kalt- und Eiszeiten sowie deren Begleiterscheinungen verständigen, um so eventuell verlässlichere Aussagen ableiten zu können.
Änderungen der Standortverhältnisse (glazigen induziert)	Die Vorhersage möglicher Änderungen basiert v.a. auf Modellen und z. T. auf Beobachtungen in eisbedeckten Gebieten. Konkrete Aussagen, ob und in welchem Ausmaß Veränderungen eintreten werden, sind nicht möglich. Es wäre allerdings zu empfehlen, dass sich Quartärgeologen, Glaziologen und Klimaforscher zum Thema Kalt- und Eiszeiten sowie deren Begleiterscheinungen verständigen, um so eventuell verlässlichere Aussagen ableiten zu können.
Änderungen der Standortverhältnisse (nicht glacigen induziert)	Änderungen sind sowohl klein- (z.B. chemische Zusammensetzung des Grundwassers) als auch großräumiger (Änderung der Grundwasserflussrichtung) möglich und sind Teil eines komplexen Systems, dessen Komponenten aus heutiger Sicht u. U. noch nicht zu erfassen sind (z.B. Bodennutzung). Darüber hinaus können die Standortverhältnisse durch die dort angesiedelte Bevölkerung verändert werden. Daher ist auch eine Vorhersage sehr unsicher und u. U. unmöglich.
Seismische Aktivität	Durch Kenntnisse der aktiven Störungszonen und konstant durchgeführten seismischen Messungen können Gebiete als seismisch aktiv oder inaktiv eingeteilt werden. Es können allerdings keine konkreten Angaben zum Zeitpunkt oder Stärke von seismischen Ereignissen gemacht werden.
Vulkanische Aktivität	Es wird eine Unterscheidung in aktive, inaktive und ruhende Gebiete getroffen. Die vulkanische Aktivität findet oft in zyklischen

	Zeitabständen statt, daher ist eine Prognose möglich, aber keine zeitlich konkreten Aussagen.
Großräumige Vertikalbewegung, Erosion, Subrosion (bei gemäßigten Klimaten)	Es handelt sich um langfristige Änderungen. Die Größenordnung der Vertikalbewegung ist in etwa bekannt und ist keinen kurzfristigen Änderungen unterworfen. Davon ausgehend kann auch eine Vorhersage zu Erosion getroffen werden (ausgehend von gemäßigten Klimaten). Die Ablaugungsvorgänge am Salzstock sind von weiteren Faktoren, wie GW-Fließrichtung abhängig. Eine Vorhersage ist daher mit größerer Unsicherheit verbunden.

3.5 Vergleich der Standorte ERAM, Schachtanlage Asse II und Gorleben

Für eine möglichst sichere Einschätzung eines zukünftigen Standortes sollten die bereits vorhandenen Erfahrungen im Bereich der bereits durchgeführten Einlagerungen, Zwischenlagerungen oder Erkundungen in Salzstöcken mit einbezogen werden. Im Folgenden sollen dazu das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), die Schachtanlage Asse II und das Erkundungsbergwerk Gorleben kurz beschrieben werden. Die wichtigsten Eigenschaften und Unterschiede der Salzstöcke können somit anhand des strukturellen Aufbaus, der Geologie und Hydrogeologie verglichen werden (Tab. 7).

Die grundlegenden Informationen über das ERAM stammen von der Internetseite des BFS (2014a), für die geologische Beschreibung wurde zusätzlich BEISE ET AL. (1991) verwendet. Die Informationen über die Schachtanlage Asse II stammen ebenfalls von der Internetseite des BFS (2014b). Ein Teil der geologischen Informationen stammt außerdem von REINHOLD ET AL. (2008).

Die Beschreibung des Erkundungsbergwerks Gorleben basiert auf Informationen des BFS (2016a), sowie der DBE TECHNOLOGY GMBH (2011). Eine detaillierte geologische Beschreibung wurde von MRUGALLA (2011) und von BORNEMANN ET AL. (2008) vorgenommen.

Tab. 7: Vergleich der Salzstöcke Morsleben, Asse und Gorleben

	Morsleben	Asse	Gorleben
Kenntnisstand	Vor Einlagerung nicht detailliert geologisch charakterisiert, vermehrt Untersuchungen erst während oder nach der Einlagerung	Detaillierte geologisch/geotechnische Untersuchungen erst nach der Einlagerung	Detaillierte Untersuchungen durch den EB 1, Acht Jahre untertägige Erkundungsprogramme
Salzstockgröße und -form (im tiefsten Aufschluss-/ Streckenniveau)	50 x 2 km ² Sehr lange, schmale Form	5 x 2 km ² Eher rundliche Form	14 x 4 km ² (bzw. 30 x 4 km ² mit Salzstock Bokeloh) Längliche Form
Interner Aufbau	Komplizierter interner Aufbau, Sattel- und Muldenstruktur	Unsymmetrischer Salzsattel, aber insgesamt eher einfacher interner Aufbau, Salzabfolge z2, z3 ist weitgehend erhalten	Staßfurt-Folge durchstößt jüngere Abfolgen, Aller- und Leine-Folgen als überkippte Mulde eingefaltet
Steinsalz kern (Hauptsalz)	Kein homogener Salz kern, Grubengebäude in der Staßfurt- und Leinefolge	Grubengebäude in der Leinefolge, Staßfurt kern beginnt ab ca. 800 m Teufe	Geplantes Grubengebäude in der Staßfurt-Folge
Hutgestein	Große und stark schwankende Mächtigkeiten, Kaliflöz Staßfurt streicht am Hutgestein aus, Anhydritscholle ragt ins Hutgestein hinein	Hutgestein eher geringmächtig ausgebildet (im Bereich Schacht 2 weniger als 40 m)	Hutgestein eher geringmächtig ausgebildet, vermutlich <10 m Residual-Hutgestein aus dem Mesozoikum an der südöstlichen Salzstockflanke
Deckgebirge	Quartär als überlagerndes Gestein, von Störungen durchsetzt, hydrologische Situation nicht vollständig erfasst	Unterer und Oberer Buntsandstein als überlagernde Gesteinseinheiten, steil stehend und verstrützt, Störungen auch an der SW-Flanke, Zufluss von gesättigtem Formationswasser möglich	Tertiär und Quartär als überlagernde Gesteinseinheiten, Schuppenbau und Störungen in weitgehend flach gelagerten Einheiten

	Morsleben	Asse	Gorleben
Eingelagertes Inventar	Insgesamt 36.700 m ³ schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert, Gesamtaktivität nach zweiter Einlagerungsphase (Ende 1998): 271.000 GBq, Gesamtaktivität 2013: 96.000 GBq, Zwischengelagerte Abfälle: 182.000 GBq	Insgesamt ca. 126.000 Fässer und Gebinde mit 47.000 m ³ schwach- und mittelradioaktiven Abfällen. Geschätzte Gesamtaktivität: 2.900.000 GBq	Keine Einlagerung, nur Erkundung
Grubengebäude	Hohlraumvolumen 10-12 Mio. m ³ , Volumen pro Kammer: 20.000-40.000 m ³ (vereinzelt größer, weitgehend versetzt), kleinster Abstand von Kammer zu Salzspiegel: 34-43 m, Zufluss NaCl-gesättigter Lösung: 12 m ³ /Jahr	Abstände zwischen den Kammern teilweise sehr gering, z.T. Verbruch der Schweben (~ 6 m dick), Kammern weitgehend versetzt, Firstspalten vorhanden Zufluss NaCl-gesättigter Lösung: 12 m ³ /Tag in 500-600 m Teufe 12 l/Tag radioaktiv belasteter Lösung vermutlich aus feuchten Rückständen aus der Verfüllung der Kaliabbau, Werte für ³ H und ¹³⁷ Cs liegen unter Freigrenze	Ca. 7,9 km Strecke und 13,4 km Bohrungen, Erkundungssohle 840 m u. GOK, ehemals fünf Erkundungsbereiche geplant, nur EB 1 zur Erkundung fertig gestellt, im Moment Offenhaltungsbetrieb bis der Salzstock möglicherweise aus dem Standortauswahlverfahren ausscheidet oder aber eine Erkundung weitergeführt wird.

4 Standortauswahlgesetz – §§ 16, 17: Übertägige Erkundung

Nach § 12 Abs. 1 StandAG muss der Vorhabenträger die Standorte übertägig und untertägig erkunden, welche im Verlauf des Auswahlverfahrens festgelegt wurden. Laut § 12 Abs. 3 StandAG kann der Vorhabenträger dabei mit Forschungseinrichtungen des Bundes kooperieren und darüber hinaus für die Erkundung auf wissenschaftliche Daten anderer Einrichtungen zurückgreifen. So sind auch die Landesbehörden dazu angehalten, geowissenschaftliche Informationen einschließlich hydrogeologischer Datensätze zur Verfügung zu stellen, sollten sie für einen Standortvergleich benötigt werden.

Wenn die Vorschläge für die übertägige Erkundung und die dazu gehörigen Sicherheitsuntersuchungen vom BfE überprüft wurden, übermittelt das BfE diese an das BMUB (§ 14 Abs. 1 und 2 StandAG). Im letzten Schritt werden die Standorte, die übertägig zu erkunden sind, durch Bundesgesetz beschlossen (§ 14 Abs. 2 StandAG).

Laut § 15 Abs. 1 StandAG erbringt der Vorhabenträger Vorschläge für das Vorgehen bei der übertägigen Erkundung der ausgewählten Standorte. Das Erkundungsprogramm und die Kriterien werden vom BfE festgelegt (§ 15 Abs. 2 StandAG) und veröffentlicht (§ 15 Abs. 3 StandAG).

Der Vorhabenträger erkundet auf Basis dieses Programmes übertägig die Standorte, die nach Bundesgesetz beschlossen wurden und führt weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durch (§ 16 Abs. 1 und 2 StandAG). Laut § 16 Abs. 2 StandAG wird nach der Bewertung anhand der Prüfkriterien und der Umweltverträglichkeitsprüfung der erkundeten Standorte eine Standortauswahl für die Wirtsgesteinsarten für die untertägige Erkundung und ein Erkundungsprogramm an das BfE übermittelt.

4.1 Durchführung der übertägigen Erkundungsarbeiten

Im ersten Verfahrensschritt konnten durch die Arbeit an Kartenmaterial, Berichten und Altbergbauprotokollen all diejenigen Standorte aus dem Verfahren geschieden sind, die als ungünstig eingestuft werden können. Darüber hinaus konnten mit Hilfe von Abwägungskriterien und einer repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung diejenigen Standorte mit einer günstigen „Eignungsprognose“ identifiziert werden. Ziel der darauf folgenden übertägigen Erkundung ist ein erster detaillierter Einblick zur Mächtigkeit und Verbreitung des Salinars und ein Überblick über das Deckgebirge des Salzstocks.

BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) haben im Rahmen des EUGENIA-Berichtes eine Zusammenfassung zur grundsätzlichen Methodik einer übertägigen Erkundung erstellt:

- Geologische Oberflächenkartierung der Umgebung des Salzstocks auch mit Hilfe von Schürfen oder flachen Bohrungen bis ca. 10 m Aufschlussniveau
- Laserscan-Befliegung des Standortes in Kombination mit einer detaillierteren Betrachtung von Karten, Luftbildaufnahmen, Fernerkundungsdaten und aerogeophysikalischen Messungen zum Auffinden von Störungszonen und Lagerung und Mächtigkeit der lithologischen Einheiten
- Geodätische Präzisionsmessungen und/oder Satellitenmessungen bzw. Befliegungen des Standortes zur Ermittlung von Hebungs- und Senkungsraten
- Tiefe Erkundungsbohrungen und geophysikalische Messungen für detaillierte Einblicke in den geologischen Aufbau des Standortes und seiner Umgebung
- Hydrogeologische Messungen in den Bohrungen zur Bestimmung der Grundwasserströmungsverhältnisse und der hydraulischen Gegebenheiten in den lithologischen Einheiten am Standort, ebenso geochemische Untersuchungen des Grundwassers
- Felsmechanische und thermophysikalische Untersuchungen, mineralogische und geochemische Untersuchungen der Bohrkerne und/oder der Gesteine des möglichen ewG und der Umgebung des Standortes
- Untersuchung des in-situ-Stressfeldes

Im Rahmen der Erkundung des Salzstocks Gorleben wurden nach BORNEMANN ET AL. (2008) neben hydrogeologischen Untersuchungen, geophysikalischen Messungen und quartärgeologischer Kartierung ab 1986 auch ein seismisches Stationsnetz am Standort installiert und in Betrieb genommen. Weiter wurden 44 Salzspiegelbohrungen, vier Tiefbohrungen bis ca. 2000 m Teufe und zwei Schachtvorbohrungen bis fast 1000 m Teufe niedergebracht.

Darüber hinaus soll erwähnt werden, dass es weitere Erkundungsmethoden gibt. Hierzu zählen:

- Thermische Tiefenmessungen zur Bestimmung der Temperaturerhöhung mit der Tiefe (siehe zur Bedeutung der Temperatur auch Kapitel 4.3)
- Geomagnetik und Gravimetrie, v. a. zur Bestimmung und Abgrenzung lithologischer Körper

BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) konkretisieren ihre Messmethodik im Weiteren auf mögliche Wirtsgesteine. Für Salinarstrukturen wird die übertägige Erkundung bestimmt durch reflexionsseismische Messungen, welche gegebenenfalls durch gravimetrische Messungen ergänzt werden können. Zur Vervollständigung sollen nach BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) zusätzlich Erkundungsbohrungen niedergebracht werden und im Zusammenhang damit Bohrlochgeophysik und darüber hinaus eine mineralogisch-geochemische Untersuchung der Bohrkerne durchgeführt werden.

BORNEMANN ET AL. (2008) haben für die Erkundung des Salzstocks Gorleben reflexions- und refraktionsseismische Messungen durchgeführt, um die Lage und den Umriss des Salzstocks beschreiben zu können. Darüber hinaus wurden Salzstockerkundungsbohrungen abgeteuft, um einen möglichst detaillierten Einblick in die Schichtenfolge und Schichtenlagerung innerhalb des Salzstocks zu gewinnen. Dabei wurde darauf geachtet, das Hauptsalz möglichst wenig zu durchbohren. BORNEMANN ET AL. (2008) erklären weiter, dass in allen Bohrungen zusätzlich Messungen zur geothermischen Situation und zum natürlichen Temperaturfeld gemacht wurden. In einigen Bohrungen sollte außerdem über seismische Messverfahren der Aufbau der nordwestlichen Flanke bestimmt werden. Die Bohrkerne wurden später für Mineralbestimmungen im Labor untersucht (BORNEMANN ET AL. 2008).

BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) weisen darauf hin, dass abgeteuft Bohrungen nicht im Zentralteil des Salzstocks, sondern in Randbereichen oder in den Bereichen der zukünftigen Schächte niedergebracht werden sollten. So wird die Schutzfunktion des Wirtsgesteins nicht negativ beeinträchtigt. Zu den Bohrlochmessungen gehören laut BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) radiometrische und elektromagnetische Reflexionsmessungen, die Aufschluss über die lithologischen Gegebenheiten, z.B. Tonlagen im Salzstock, geben können. Außerdem werden Bohrungen in das Hutgestein des Salzstocks abgeteuft, um dessen Aufbau und Eigenschaften bestimmen zu können (BOLLINGERFEHR ET AL. 2011).

Zusätzlich dazu sollten nach eigener Einschätzung die bestehenden Berichte, z.B. die VSG und alle damit im Zusammenhang stehenden Untersuchungen, Teil der Betrachtungen bleiben. Für einen ersten Überblick sind geologische und geodätische Karten sowie geologische Schnitte und Modelle unerlässlich. Wie bereits im ersten Verfahrensschritt erwähnt, sind viele Einschätzungen, v. a. Aussagen zur weiteren Umgebung, Störungszonen, Magmatismus etc. über den Standort Gorleben hinaus für Norddeutschland gültig. Für einen umfassenden regionalen Einblick in Lithologie, Grundwasserbeschaffenheit, Altlasten etc. können außerdem bestehende Datenbanken, wie z.B. der Kartenserver NIBIS® des LBEG, genutzt werden.

Außerdem sollte die Wichtigkeit und Aussagekraft von seismischen Untersuchungen noch einmal betont werden. Vor allem eine 3D-Seismik des Standortes kann wichtige Hinweise zur Ausdehnung, zur tektonischen Situation im Deck- und Nebengebirge, zum Grenzbereich Salzstock/Deckgebirge sowie zur halokinetischen Ausbildung des Salzstocks geben.

4.2 Geowissenschaftliche Sachverhalte und geeignete Erkundungsergebnisse

Für eine umfassende übertägige Erkundung müssen eine Vielzahl von Messungen und Erkundungsmethoden durchgeführt werden. Welche Techniken dabei angewendet werden können, wurde im Kapitel 4.1 zusammengefasst. Im nachfolgenden Text soll nun genauer erläutert werden, welche Untersuchungsergebnisse aus der übertägigen Erkundung gewonnen werden können.

Großräumige Kartierung

Zu einer vollständigen Betrachtung der geologischen Situation im Gebiet der Salzstöcke gehören ebenfalls großräumige Kartierungen und ein abgeleitetes Modell der Schichtenfolge und seiner räumlichen Verteilung in der Umgebung des Salzstocks. Die geologische Situation in Deutschland ist durch geologische Karten sehr gut belegt. Allerdings fehlen lokal oftmals detaillierte Kartenwerke zur Geologie, zur hydrologischen Situation, zur Landnutzung und Bebauung etc. oder sind nicht mehr aktuell. Eine Neuaufnahme am Standort und eine detaillierte Kartierung der Umgebung sind dazu geeignet, geologischen Karten zu bestätigen und gegebenenfalls zu ergänzen. Es können auch dadurch bereits Aussagen über Lagerungsverhältnisse getroffen und die tektonische Situation im Deckgebirge erfasst werden. Laut KUKLA ET AL. (2011) ist außerdem eine quartärgeologische Kartierung nötig, um eiszeitliche Entwicklungen wie Terrassenablagerungen, Rinnenstrukturen, glazigene Deformationsstrukturen etc. zu erfassen.

Die bei der Kartierung gesammelten Gesteinsproben können petrographisch im Labor untersucht werden. Es können so Aussagen zur genauen Zusammensetzung, Porosität, Dichte, Durchlässigkeit, Wärmeleitfähigkeit etc. der einzelnen Gesteinseinheiten gemacht werden. Im Anschluss daran kann, wie in Kapitel 4.3 erläutert, die Temperaturerhöhung mit der Tiefe berechnet werden.

Darüber hinaus müssen für die jegliche Arbeiten am Standort, wie für seismische Messungen, Bohrungen etc. die Landnutzungs- bzw. Eigentumsrechte bekannt sein. So können möglicherweise im Zuge der Kartierung Gespräche und Kontakte mit der Bevölkerung begonnen und/oder es kann ein Überblick über bestehende Industrieanlagen, Windparks oder ausgedehnte landwirtschaftliche Betriebe gewonnen werden.

Tektonische Situation und Beschreibung der Salzstockumgebung

Durch 3D-seismische Untersuchungen kann ein Abbild des Salzstocks und des angrenzenden Deckgebirges mit der Tiefe erzeugt werden. Darüber hinaus können auch größere Störungen und Brüche identifiziert werden. Durch hochauflösende Seismik können darüber hinaus Störungsmuster erkannt werden, die mittels 2D-Seismik nicht klar zu diagnostizieren sind. Mit reflexions- und refraktionsseismischen Messungen und Salzstockunterschießungen können genaue Lage, Begrenzung und Umriss des Salzstocks sowie dessen Oberfläche und Basis im Detail bestimmt werden. Mit dem derzeitigen Stand der Technik lassen sich Auflösungen im Bereich 5-10 m für 3D-seismische Aufnahmen erreichen (KUKLA ET AL. 2011). Die Lagerungsverhältnisse der Deckschichten und die Ausbildung der Salzstockoberflächen können durch hochauflösende flachseismische Untersuchungen abgebildet werden (KUKLA ET AL. 2011). In KÖTHE ET AL. (2007) wird darüber hinaus beschrieben, dass am Standort Gorleben mit Hilfe von seismischen Untersuchungen auch die unterlagernde geologische Situation, z.B. die Identifizierung der Zechstein-Basis oder die Analyse markanter Störungszonen, besser verstanden werden konnte.

Hierbei soll daran erinnert werden, dass grundwasserstauende Sedimente wie verfestigte Tongesteine keine Voraussetzung für einen Endlagerstandort darstellen sollten, da die Grundlage des sicheren Einschlusses des Abfalls das Konzept des ewG darstellt. Der ewG, wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, umschließt als Teil des Mehrbarrierensystems das eigentliche Endlagerbergwerk. Die Funktion des ewG als Teil des Wirtsgesteinskörpers ist der sichere Einschluss des eingelagerten Inventars für den Zeitraum von einer Million Jahren. Verfestigte Tongesteine können aber im Standortvergleich als positive Eigenschaft angesehen werden. Sie können in ihrer Eigenschaft als wasserstauende Barriere sowohl verhindern, dass ungesättigte Formationswässer zum Salzstock fließen, als auch den Zutritt austretender belasteter Lösung aus dem Salzstock ins Grundwasser verhindern. Darüber hinaus stellen Störungen sowie Versätze in den Tonsteinschichten potentielle Wegsamkeiten dar und sollten deshalb bekannt sein. Darüber hinaus muss ihre Bedeutung für das mögliche Endlager (gegebenenfalls auch im Zuge einer Abwägung) bewertet werden.

Durch Bohrungen können der Salzspiegel (Grenze Hutgestein – Salzstock) und die Ausbildung des Hutgesteins erfasst werden. Das Relief im Hutgestein kann außerdem Aufschluss über glazigene Ereignisse (bis hin zur Freilegung des Salzstocks) geben. Laut KÖTHE ET AL. (2007) konnte bei einer Bohrung in der Nähe der südöstlichen Flanke des Salzstocks Gorleben ein Hutgestein aus der Hebungsphase Malm bis Unterkreide erbohrt werden. Der Salzstock muss in dieser Zeit freigelegt gewesen sowie im Anschluss daran verformt und überdeckt geworden sein. Im Hutgestein des Salzstocks Gorleben lassen sich außerdem kompakte Anhydritgesteine

identifizieren (KÖTHE ET AL. 2007). Tonhaltige Bereiche verhindern lokal Subrosion innerhalb des Hutgesteins.

KÖTHE ET AL. (2007) beschreiben außerdem, dass sich die Hebung des Salzstocks und das Volumen des ehemaligen Salzkissens berechnen lassen, wenn die genaue Ausdehnung des Salzstocks bekannt ist. Das in den Salzstock gewanderte Volumen an Salz lässt sich demnach aus der Analyse der halokinetisch bedingten Randsenken ableiten. Um das Volumen des ursprünglichen Salzkissens (also vor der Halokinese) zu ermitteln, werden die Mächtigkeit der sekundären Randsenken und das Volumen des Salzes unter dem Salzstock addiert (KÖTHE ET AL. 2007).

Geothermische Untersuchungen

Im Rahmen von geothermischen Untersuchungen werden Temperaturprofile als kontinuierliche Messungen über die gesamte Bohrlänge aufgenommen. Daraus können die Wärmeleitfähigkeiten der stratigraphischen Einheiten des Deckgebirges, zumindest für bindige Festgesteine, bestimmt werden. Die regionale Wärmestromdichte, welche für Temperaturberechnungen (Kap. 4.3) benötigt wird, ist im Großen bekannt und ändert sich lokal nicht nennenswert. Die Wärmeflussdichte in der Umgebung eines Salzstocks umfasst Werte von ca. 100-140 mW/m² (KLINGE ET AL. 2007, JENSEN 1983), im Gegensatz zu nicht salinar beeinflussten Bereichen mit Durchschnittswerten von 55-65 mW/m² (MAJOROWICZ & WYBRANIEC 2010) (siehe auch Kap. 3.1.4). Die Wärmeflussdichte kann über Bohrlochmessungen berechnet und synthetische Temperaturprofile können erstellt werden (KLINGE ET AL. 2007). Ist die Temperaturentwicklung mit der Tiefe bekannt, kann in Hinblick auf Temperaturgrenzwerte eine Eignung des jeweiligen Standortes festgestellt bzw. das Endlagersystem dementsprechend ausgelegt werden (v. a. Abstand Strecken bzw. Bohrlöcher zueinander, Behälterbeladungen). Laut KLINGE ET AL. (2007) kann aus den Temperaturmessungen darüber hinaus auch ein Rückschluss auf die Grundwasserbewegungen gezogen werden, da zum geothermischen Wärmestrom aus der Tiefe auch ein Wärmeeintrag durch Grundwassertransporte stattfinden kann.

Grundwasserbeschaffenheit und -bewegung

Mit Hilfe von Bohrlochmessungen wie Dichtelogs, Widerstandsmessungen und Gamma-Ray-Logs kann das Grundwasser physikalisch analysiert und seine Dichte sowie elektrische Leitfähigkeit bestimmt werden. Dieses Vorgehen ist wichtig, um Salinitätsprofile erstellen zu

können und einen Überblick über die Porenwasserdichte zu erhalten. Wie KLINGE ET AL. (2007) zeigt, kann darüber hinaus die Süß- und Salzwasserverteilung im Untergrund nachvollzogen werden. Darüber hinaus können mit Hilfe von isotopehydrologischen Untersuchungen der Isotopenverhältnisse des Wasserstoffs, Kohlenstoffs und Sauerstoffs (^1H , Tritium- und ^{14}C -Verteilung, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) und der im Wasser enthaltenen Edelgase eine ungefähre Altersbestimmung und somit eine Abschätzung der Verweildauer des Wassers in bestimmten Tiefenlagen ermittelt werden (KLINGE ET AL. 2007). Es ist außerdem von Bedeutung, die Grundwasserbewegung und Fließrichtung zu bestimmen, um eine Durchmischung von Süß- und Salzwasserkörper identifizieren sowie um mögliche Freisetzungspfade und Fließzeiten in 2D wie auch 3D modellieren zu können. Eine detaillierte Beschreibung zur Hydrogeologie, zur Aquifergliederung, zur chemischen Spezies im Grundwasser etc. wurde bereits in Kapitel 3.1.4 durchgeführt.

Identifizierung gespannter Gasvolumina an den Salzstockflanken

Salzstöcke können Teil eines Erdöl-/Erdgas-Systems sein. Durch die Undurchlässigkeit von Salzgestein ist auch der Aufstieg von Kohlenwasserstoffen behindert. Das heißt, wenn das unterlagernde Gestein die Eigenschaften eines Speichergesteins (v. a. ausreichende Porosität und Permeabilität) aufweist und mit dem überlagernden Abdeckgestein (hier Salz) eine Fallenstruktur bildet, können sich Erdöl und/oder Erdgas dort anreichern. Gaslagerstätten aus dem Zechstein haben zumeist eine Anhydrit-Abdeckung. Ein Beispiel ist die Lagerstätte Goldenstedt/Visbeck (südwestlich von Bremen), dessen Speichergestein das Staßfurt-Karbonat (Ca_2) und das Abdeck-Gestein Anhydrit (A_2) ist. Es ist grundsätzlich denkbar, dass eine Erdöl-/Erdgaserkundung eine Endlagererkundung und -errichtung aus einer Konkurrenzsituation heraus erschweren könnte. Andererseits stellen die gewonnenen Daten aus Erkundungstätigkeiten eine sehr gute Grundlage für die Salzstockerkundung dar. Vor allem in Norddeutschland besteht bereits ein dichtes Netz an 2D-, zum Teil auch 3D-Datensätzen, die zum großen Teil aus der Erkundung von Erdöl-/Erdgas-Lagerstätten stammen. Diese Daten sind Eigentum der jeweiligen Firmen. Es müsste geprüft werden, ob und zu welchen Bedingungen diese privatwirtschaftlichen Daten für ein gesellschaftlich derart bedeutsames Vorhaben verwendet werden dürfen. Generell können Kohlenwasserstoffe, die sich in einem Reservoir am Salzstock befinden, ein Hinweis auf Kohlenwasserstoffe im Salzgestein sein, wenn diese durch Wegsamkeiten eingedrungen sind. Im Umkehrschluss gilt allerdings nicht, dass ein fehlendes Kohlenwasserstoff-Vorkommen am Salzstock Kohlenwasserstoff-Reservoir im Salzgestein selbst ausschließt.

Tektonische Beanspruchung des Salzkörpers

BORNEMANN ET AL. (2008) stellen fest, dass eine Abhängigkeit zwischen der äußeren Form eines Salzstocks und seinem internen Aufbau besteht. BORNEMANN ET AL. (2008) beschreiben weiter, dass kleine ovale und rundliche Salzstrukturen einen sehr komplizierten internen Aufbau zeigen würden. Bei ovalen und langgestreckten Salzstöcken sei die großräumige Verfaltung weniger ausgeprägt. In der Längsachse solcher Diapire sollen laut BORNEMANN ET AL. (2008) großräumige homogene Salzkerne erbohrt werden können.

Eine gleichmäßige Antiklinalstruktur des Salzstocks kann ein Hinweis auf eine ungestörte Internstruktur mit einem homogenen Salzkern sein. Sehr schmale und langgezogene Salzmauern sind andererseits beispielsweise ungeeignet, da es dort vermutlich keinen homogenen Steinsalzkern gibt, der in seiner räumlichen Ausdehnung die Erschließung eines Endlagers ermöglicht. Ein Beispiel für eine Salzmauer mit steilstehenden und teilweise stark verfalteten Schichten ist das Kaliwerk Sigmundshall. Als Grundvoraussetzung muss gelten, dass ein homogener Salzkern vorhanden sein muss. Dieser muss weiter in seiner Ausdehnung groß genug sein, um einen ewG und das gesamte Endlagerbergwerk mit allen Sicherheitsabständen realisieren zu können.

Weitere geologisch-strukturelle Erscheinungsformen und deren mögliche Bedeutung in Hinblick auf einen ungestörten Steinsalzkern wurden von der BGR in der Salzstudie (KOCKEL & KRULL 1995) zusammengefasst. Positiv wurden dabei folgende Eigenschaften bewertet:

- Große Quererstreckung des Salzkörpers
- Gegen die Tiefe divergierende und symmetrische Salzstockflanken (bzw. nur schwach konvergierend)
- Fehlen von komplexen Überhangstrukturen
- Flach gewölbte Dachstruktur

Als negativ für die Wahrscheinlichkeit eines ausreichend großen Steinsalzkerne werden laut KOCKEL & KRULL (1995) folgende Erscheinungsbilder bewertet:

- Geringer Querschnitt des Salzkörpers
- Gegen die Tiefe stark konvergierende Salzstockflanken
- Weitreichende Überhänge, Salzkeile in benachbarten Gesteinsbereichen, wobei diese in größeren Tiefen als möglicherweise unschädlich eingeschätzt werden
- Stark gewölbte Dachstruktur
- Deutliche Inversionstektonik des Salzstocks und der benachbarten Gesteinsbereiche

Eine endgültige und detaillierte Aussage über Internstruktur, Salzkern und tektonische Umbildungsprozesse kann nicht allein über einige wenige Salzstockerkundungsbohrungen erreicht werden. Eine verlässliche Aussage, auch im Hinblick auf die Eignung des Wirtsgesteins und die Möglichkeit der Ausweisung eines ewG, kann abschließend erst mit der untertägigen Erkundung gewonnen werden.

Barrierefunktion des Deckgebirges

KOCKEL & KRULL (1995) haben in ihrem Bericht zur Barrierefunktion des Deckgebirges eine qualitative Abstufung erstellt. Folgende Szenarien werden darin genannt (Reihenfolge der Aufzählung von günstig zu weniger günstig):

- Vollständige Überdeckung des Hutgesteins mit tonigen Sedimenten der Unterkreide
- Vollständige Überdeckung des Hutgesteins mit Sedimenten der Oberkreide
- Vollständige oder annähernd vollständige Überdeckung des Hutgesteins mit Tonen des Alttertiärs, v. a. des Rupeltons des Mitteloligozän

Als negativ werden folgende Möglichkeiten betrachtet (KOCKEL & KRULL 1995):

- Überdeckung des Hutgesteins durch sandige Gesteine des Alttertiärs ohne Rupelton
- Überdeckung des Hutgesteins nur mit Sedimenten des Oberoligozän, Neogen oder des Quartärs, da diese möglicherweise als Grundwasserreservoir genutzt werden können und ein Kontakt mit der Biosphäre möglich ist.

KOCKEL & KRULL (1995) beschreiben darüber hinaus, dass in Bezug auf mögliche strukturelle Komplikationen im Deckgebirge eine intakte Überdeckung mit Sedimenten ohne Störungen positiv zu bewerten ist. Scheitelstörungen oder Scheitelgräben können die strukturelle Integrität stören, insbesondere wenn sie bis in das Hutgestein reichen. Dies gilt ebenso für quartäre Rinnen, die die vollständige Überdeckung unterbrechen oder Hinweise auf subrezente Subrosion der Salzstruktur geben (KOCKEL & KRULL 1995).

Hierbei soll noch einmal auf Tab. 3, Punkt 6 hingewiesen werden. Eine Überdeckung mit Festgestein, wie z.B. eine durchgehende Tonschicht, ist im Hinblick auf den Schutz des ewG wie auch einen möglichen Stofftransport wünschenswert und bei einer Abwägung zwischen unterschiedlichen Standorten, als positiv zu bewerten. Allerdings wurde bereits im Kapitel 3.1.1 die stark erosive Wirkung von kaltzeitlichen Ereignissen, insbesondere durch die Gletscherüberfahrung, erläutert. Inwieweit die Überdeckung eines Standortes einem solchen Ereignis standhält, muss an jedem Standort neu überprüft werden. So kann auch abgeschätzt werden, inwieweit eine solche Festgesteinsüberdeckung im Zeitraum von einer Million Jahren

und der Sicherheit mehrerer Kaltzeiten erhalten bleiben wird. Auch die Ungestörtheit der überlagernden Schichten kann zwar heute festgestellt werden, aber auch hierbei muss von einer künftigen Änderung der rezenten Situation im Nachweiszeitraum gerechnet werden.

4.3 Wärmeleitfähigkeitsmessungen an postpermischen Gesteinseinheiten

Der geothermische Gradient am Standort (Temperaturzunahme mit der Tiefe) ist für die Wahl des Endlagerstandortes ein wichtiger Faktor und sollte so früh wie möglich bekannt sein, da die Temperatursituation einen Einfluss auf die Endlagerauslegung besitzt. In der VSG (BEUTH ET AL. 2012, MÖNIG ET AL. 2012) wurde eine Grenztemperatur von 200 °C an der Behälteroberfläche festgelegt. Diese Grenztemperatur ist im Moment in Diskussion. Eine weitere Einschränkung ist der Arbeitsschutz laut KLIMABERGV (1983), der eine maximale Arbeitstemperatur von 52 °C für Arbeiten im Salzbergbau vorschreibt. Unter diesem Aspekt geht eine aktuellere Einschätzung der BGR (WEBER 2015) von einer maximalen Teufe des Grubentiefsten von 1000 m aus. Diese Tiefe soll sowohl eine Strecken- als auch eine Bohrlochlagerung ermöglichen.

Laut BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) kann die Temperatur in einem gewissen Rahmen beispielweise durch längere Zwischenlagerzeiten, geänderte Behälterbeladungen oder Bewetterung beeinflusst werden. Eine erhöhte Temperatur hat laut ESK (2011) aber wiederum den Vorteil, dass die Kompaktionsrate des Salzgrusversatzes und die Kriechfähigkeit des Salzes erhöht sind. Diese Effekte sind in Bezug auf den schnellen Verschluss des Endlagerbergwerks erwünscht, die hohe Plastizität des Salzgesteins würde aber eine spätere Rückholung erschweren. Darüber hinaus gelten lediglich Temperaturen bis 70 °C als betriebstechnisch beherrschbar (ENGELMANN ET AL. 1995).

Die Temperaturerhöhung mit der Tiefe für das ungestörte System (also ohne wärmeentwickelnden Abfall) wurden bisher erst mittels Bohrungen oder späterer Messungen untertage ermittelt. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Temperatur-Tiefen-Verteilung aus der terrestrischen Wärmeflussdichte und den Wärmeleitfähigkeiten der Lithologien des Deckgebirges abgeschätzt.

Da laut StandAG in jedem Verfahrensschritt eine Sicherheitsuntersuchung gefordert wird, sollte der Temperaturgradient möglichst früh bekannt sein. Um eine Sicherheitsbewertung durchführen zu können, muss beispielsweise ein vorläufiges Endlagerkonzept vorhanden sein. Die Grenztemperaturen im Zusammenspiel mit der Temperatur im Endlagerniveau bestimmen wiederum im Endlagerkonzept die Streckenabstände bzw. die Abstände der Abfallgebinde zueinander. Das heißt, dass verschiedene Aspekte miteinander im Zusammenhang stehen. Die Bestimmung der Temperatur könnte dabei allerdings mit Hilfe der folgenden Vorgehensweise sehr früh im Verfahren und ohne Bohrung und langfristige Messungen im Endlagerniveau erfolgen.

4.3.1 Experimentelle Arbeiten zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten im Deckgebirge

Es wurden im Rahmen mehrerer Exkursionen 20 Proben gesammelt, die eine repräsentative Abfolge der Stratigraphie des postpermischen bis tertiären Untergrundes Norddeutschlands widerspiegeln (Tab. 8). In alle Proben wurde für die spätere Messung ein circa 7,0 cm tiefes Loch mit einem Durchmesser von 0,5 cm gebohrt. Die lufttrockenen Handstücke wurden unter Vakuum wassergesättigt, um aussagekräftige Wärmeleitfähigkeitswerte zu erhalten, die die Situation im geologischen Untergrund widerspiegeln. Die Proben wurden dafür zuerst mindestens eine halbe Stunde evakuiert und unter Vakuum komplett mit Wasser bedeckt. Der danach herrschende Luftdruck presste das Wasser in den Porenraum der Probe.

Im Folgenden wird die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten kurz dargestellt:

Die Messung wurde mit Hilfe des Messgeräts „SolidTherm“ des Unternehmens GeoTec (Clausthal-Zellerfeld) durchgeführt (Abb. 21).



Abb. 21: Messgerät „SolidTherm“ der Firma GeoTec (Clausthal-Zellerfeld)

Vor dem Beginn des eigentlichen Messvorgangs muss eine konstante Temperatur in der Versuchsanordnung herrschen. Anschließend wurde die Sonde während der zwei minütigen Messdauer bei konstanter Heizleistung um circa 1-2 °C erwärmt. Der Temperaturverlauf hängt dabei von den thermischen Leitfähigkeiten des Gesteins ab. Die Temperatur wurde dabei über

die 4,0 cm lange Sonde gemittelt und dieser gemittelte Wert ist somit vor allem bei Gesteinen mit ausgeprägtem Lagenbau und/oder heterogener Korngrößenverteilung besser geeignet als das Ergebnis einer punktförmigen Messung. Aus der Temperaturkurve konnte dann die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden.

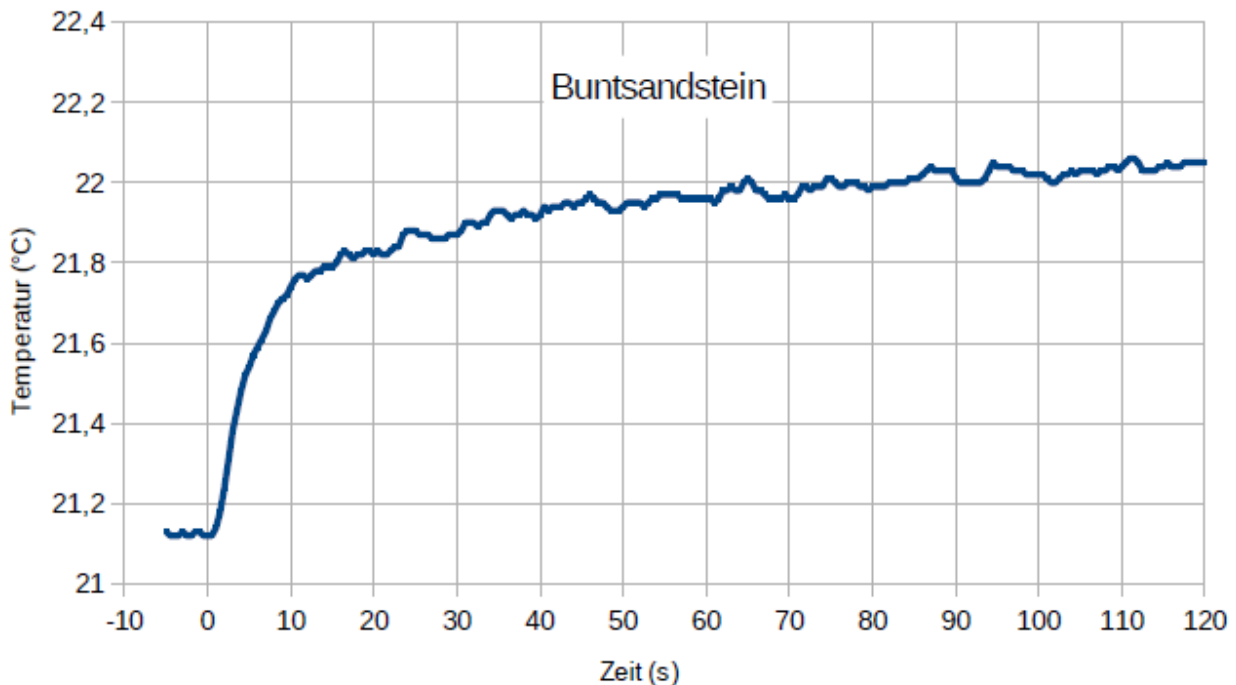


Abb. 22: Temperaturmessung am Beispiel des Buntsandsteins, Messzeit 120 s

Nach dem Einschalten der Heizung wird die Temperatur während einer Messzeit von 120 Sekunden bestimmt (Abb. 22). Es werden insgesamt sechs Messungen pro Probe durchgeführt und deren Ergebnisse gemittelt. Für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit werden die Maximalwerte der Temperaturänderungen (ausschließlich des Anstiegs zu Beginn) in folgende Formel eingesetzt (DIN EN ISO 22007-1:2012):

$$K = \frac{Q}{4 * \pi * L * \Delta \overline{\ln_{8s < t < 120s}(t)}} * C \quad (1)$$

K (in W/m*K) beschreibt die Wärmeleitfähigkeit, Q (in W/m²) die Wärmestromdichte, L (in cm) steht für die Sondenlänge (4 cm) und C stellt einen empirischen Korrekturfaktor für die verwendete Sonde dar. Die Ergebnisse der Messungen, sowie die Standardabweichung für jede stratigraphische Einheit (jeweils sechs Einzelmessungen) sind in Tab. 8 zu finden. Die Einzelmesswerte und die Berechnung von Mittelwert, Varianz und Standardabweichung sind im Anhang zu finden.

Tab. 8: Übersicht der gesammelten Proben, deren gemessene Wärmeleitfähigkeit und Standardabweichung der jeweils sechs Einzelmessungen jeder stratigraphischen Einheit

			K (W/mK)	Standard-abweichung
Kreide	Oberkreide	Turon-Pläner	2,97	0,07
	Unterkreide	Flammenmergel	2,99	0,14
		Hilssandstein	3,20	0,07
		Wealden-Sandstein	4,94	0,22
		Serpulit-Kalk	2,42	0,08
Jura	Malm	Gigas-Schichten	2,52	0,04
		Korallenoolith	2,93	0,09
	Dogger			
	Lias	Posidonienschiefer	2,90	0,11
Trias	Keuper	Rhät-Sandstein	3,30	0,04
	Muschelkalk	Sandstein, vmtl. calcitisch gebunden	3,18	0,03
		Heidelberg-Sandstein	3,39	0,07
		Trochitenkalk	2,93	0,03
		Dolomitischer Mergel	3,65	0,08
		De-Dolomit	3,01	0,06
		Wellenkalk	3,01	0,08
	Buntsandstein	Röt-Ton	2,19	0,04
		Solling-Folge	3,35	0,12
		Hardeggen-Sandstein	4,47	0,23
		Oolith ("Rogenstein")	2,86	0,02
		Sandstein (Einheit Bröckelschiefer)	3,15	0,09

Die Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz wurde nicht im Labor bestimmt. Der Wert von 5,22 W/mK kann unter anderem in DELISLE (1980) und in KOCK ET AL. (2012) nachgelesen werden. Es wird zur Vereinfachung der Rechnung von einer homogenen Steinsalz-Zusammensetzung des Salzstocks ausgegangen.

Ist die Gesteinsabfolge über einem Salzstock bekannt, kann aus deren Wärmeleitfähigkeiten die Temperaturverteilung mit der Tiefe abgeschätzt werden. Die Berechnung der Temperaturdifferenz erfolgt mit folgender Formel:

$$\Delta T = \frac{Q * \Delta z}{K} \quad (2)$$

Q (in W/m²) beschreibt die terrestrische Wärmestromdichte, die im norddeutschen Becken 100-140 mW/m² (Berechnungen hierzu z.B. in KLINGE ET AL. 2007, JENSEN 1983) über Salzstöcken und ca. 55-65 mW/m² in nicht salinar beeinflussten Bereichen MAJOROWICZ & WYBRANIEC (2010) beträgt.

z (in m) beschreibt die Tiefenlage einer Gesteinseinheit, Δz (in m) die Schichtmächtigkeit einer Einheit, ΔT (in °C) die Temperatur in der betrachteten Schicht.

Zur Berechnung der Temperatur in einer bestimmten Teufe muss darüber hinaus die Jahresdurchschnittstemperatur für den norddeutschen Bereich addiert werden. Für diesen kann ein Wert von 9 °C angenommen werden.

$$T(x) = T(\text{Oberfläche}) + \Delta T(\text{gesamt}) \quad (3)$$

$T(x)$ (in °C) beschreibt die Temperatur in einer bestimmten Teufe, $T(\text{Oberfläche})$ (in °C) die Jahresdurchschnittstemperatur an der GOK, $\Delta T(\text{gesamt})$ (in °C) stellt die Summe der Temperaturen in den betrachteten Gesteinseinheiten dar.

Ergebnisse der durchgeführten Rechenbeispiele

Die durchgeführten Berechnungen zu den jeweiligen Bohrungen sind im Anhang zu finden. Nachfolgend sollen die Ergebnisse zusammenfassend vorgestellt und diskutiert werden.

1. Bohrung Remlingen 5, Salzstock Asse

Die Stratigraphie sowie die Mächtigkeiten der einzelnen Schichtpakete, die bei der Bohrung Remlingen 5 angetroffen wurden, sind aus KLARR ET AL. (1990) entnommen. Danach liegt die Bohrung laut KLARR ET AL. (1990) ca. 550 m südwestlich von Schacht Asse 2 und erreicht eine Endteufe von 2256 m. Nach dem Quartär wurden Gesteine der Trias (Keuper, Muschelkalk und Buntsandstein) bis 1041 m Teufe erbohrt. Daran schließt das Hutgestein sowie ein Bereich Leine-Steinsalz an. In einer Teufe von 1097 m wird das Staßfurt-Hauptsalz erreicht. Die 12 m mächtige Gesteinseinheit des Quartär wird aufgrund der geringen Mächtigkeit vernachlässigt. Der berechnete Wert der Temperatur in 1097 m schwankt zwischen 43 °C und 57 °C. Die gemessene Temperatur (AGEMAR ET AL. 2014) liegt im Bereich 45 °C bis 53 °C. Die errechneten Werte entsprechen somit dem tatsächlichen Temperaturbereich.

2. Salzkissen östlich von Berlin

Es wurden Daten zur Mächtigkeitsverteilung und Stratigraphie sowie Temperaturreheprofile ausgewertet. Die errechneten Temperaturwerte wurden mit den Werten der Temperaturprofilmessung im Ruhezustand verglichen. Ruhemessung heißt, dass die gemessenen Werte nicht mehr von der Bohrung bzw. der Bohrspülung beeinflusst sind. Im Anschluss an das Quartär wurden Gesteine der Trias (Muschelkalk und Buntsandstein) bis ca. 630 m Teufe erbohrt. Daran schließen sich Einheiten der Aller- und Leinefolge an. Die Rechnung wurde für eine Teufe von 800 m durchgeführt, da dies ein mögliches Endlagerniveau

darstellen könnte. Der berechnete Wert der Temperatur in 800 m Teufe liegt zwischen 35 °C und 45 °C. Aus dem Temperaturreheprofil kann ein ungefährender Wert von 44 °C abgelesen werden.

Der errechnete Temperaturbereich entspricht somit den erbohrten Werten. Allerdings sollte darauf hingewiesen werden, dass sich Ungenauigkeiten bei der Abschätzung der Mächtigkeiten der stratigraphischen Einheiten ergeben, was zu einer leichten Abweichung des Ergebnisses führen kann. Da überlagernd in den Gesteinseinheiten des Quartärs unkonsolidierte Gesteine vorliegen, wird die Wärmeleitfähigkeit dieses Schichtpakets mit 2,0 W/mK (ZOTH & HAENEL 1988) als Mittelwert zwischen unkonsolidierten Sand und Mergel abgeschätzt.

3. Salzstock bei Greifswald (Mecklenburg-Vorpommern)

Es wurden Daten zur Mächtigkeitsverteilung und Stratigraphie sowie ein Bericht über die Durchführung und Auswertung eines Temperaturreheprofils verwendet. Es wurden Gesteine des Pleistozäns, Tertiärs (Eozän), der Unterkreide und des Jura erbohrt. Diese erreichen eine Mächtigkeit von 464 m Teufe, danach schließt sich der Salzstock an. Die Berechnung wurde wieder bis in 800 m Teufe durchgeführt. Die Berechnung der Temperatur zeigte Werte im Bereich von 33 °C bis 42 °C. Aus dem Ruheprofil kann ein Temperaturwert von 37 °C abgelesen werden.

Der errechnete Wert für die Temperatur in 800 m Teufe entspricht dem zu erwartenden Wert des Ruheprofils. Allerdings muss hierbei erwähnt werden, dass eine Fehlerquelle in der ungenauen stratigraphischen Beschreibung des Bohrprofils liegt. Die Mächtigkeiten der Lithologien und deren genaue Verteilung innerhalb der stratigraphischen Einheiten müssen abgeschätzt werden, was zu weiterer Ungenauigkeit führt. Die überlagernden quartären Gesteinseinheiten werden als Gemisch von Geschiebemergel und Sande beschrieben. Es wird wieder ein Wert von 2,0 W/mK (ZOTH & HAENEL 1988) als Mittelwert zwischen unkonsolidierten Sand und Mergel für die Berechnung verwendet.

Generell soll angemerkt werden, dass die Jahresdurchschnittstemperatur in geologischen Zeiträumen kein konstanter Wert ist, und in der jüngsten Erdgeschichte konnten immer wieder bedeutende Klimaveränderungen in glazialen Zyklen nachgewiesen werden. Die Klimaänderungen der letzten 450.000 Jahre sind in Abb. 23 dargestellt.

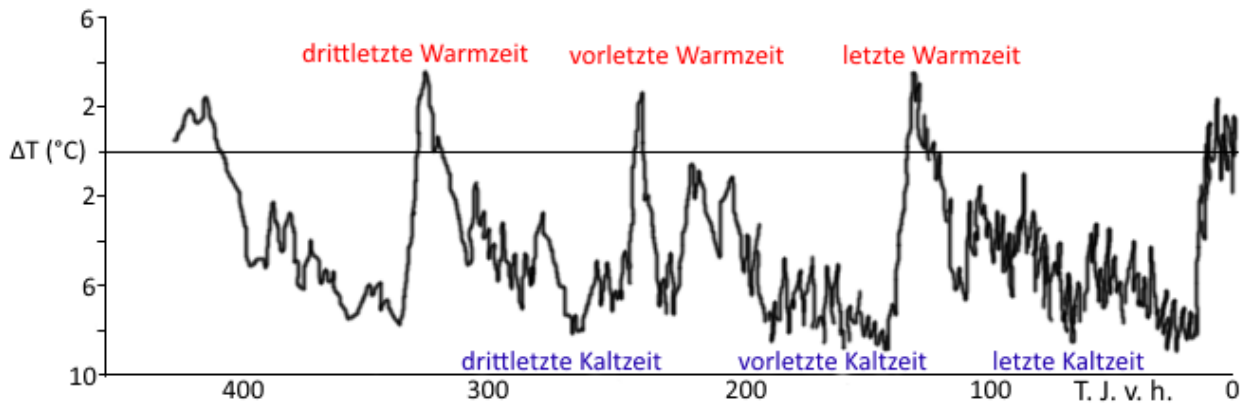


Abb. 23: Entwicklung der globalen Durchschnittstemperatur der letzten 450.000 Jahre vor heute (bearbeitet nach BUBENZER & RADTKE 2007)

Durch detaillierte marine Sedimentbohrkerne kann das Klima der letzten 5 Mio. Jahren rekonstruiert werden; die Temperaturänderungen zwischen Kalt- und Warmzeiten liegen in Mitteleuropa bei ca. 10-12 °C mit maximal möglichen Schwankungen von mehr als 20 °C (BUBENZER & RADTKE 2007, MAJOROWICZ & WYBRANIEC 2010). Zu Beginn unserer heutigen Epoche, dem Holozän (Grenze Pleistozän-Holozän zwischen 10.800 und 11.650 Jahren) gab es laut BUBENZER & RADTKE (2007) eine rasche Erwärmung. Seit ca. 10.000 Jahren herrschen sehr stabile Klimabedingungen vor. Eine Ausnahme ist eine Temperaturdepression vor ca. 8.200 Jahren, die allerdings nur schwach ausgebildet und nicht überall nachweisbar war.

Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt, wird das Eintreten von mehreren Eiszeiten und Interglazialen in den kommenden 1 Mio. Jahren als sicher angenommen. Die auslösenden Faktoren für Klimaänderungen in der erdgeschichtlichen Vergangenheit bestehen bis heute und werden auch in Zukunft Einfluss nehmen. Aus den oben genannten Beispielen wird darüber hinaus deutlich, dass sich die Temperaturen auch während warm- und kaltzeitlicher Phasen sehr stark ändern können. Die Jahresmitteltemperatur eines Standortes wirkt sich direkt auf die Temperaturen im geologischen Untergrund aus und bestimmt somit auch die Temperatur im Einlagerungsbereich. Eine Angabe über die zu erwartende oder tatsächliche Temperatur im Einlagerungsbereich stellt also eine Momentaufnahme dar, deren Änderung als sicher anzunehmen ist. Eine Berechnung der Temperaturentwicklung im Einlagerungsbereich und seiner Umgebung, welche sich allein auf die heutige Temperatur bezieht, ist also so nicht machbar, bzw. geht mit erheblichen Unsicherheiten einher.

In diesem Zusammenhang sollte darüber hinaus darauf hingewiesen werden, dass die Temperaturentwicklung vor allem für die nahe Zukunft entscheidend und sicherheitsrelevant ist. Nahe Zukunft bezieht sich hierbei auf die Betriebsphase sowie die „thermische“ Phase der Einlagerung, in der die Behältertemperaturen noch relativ hoch sind. Sinkt die Behältertemperatur, ist die Temperatur im Einlagerungsniveau von untergeordneter Bedeutung.

4.4 Entwicklungsmöglichkeiten eines Salzstocks

Da im Rahmen dieser Arbeit keine Erkundung stattfindet, können ab dem zweiten Verfahrensschritt lediglich theoretische Aussagen bezüglich eines Standortes getroffen werden. Grundsätzlich gilt, dass zum Zeitpunkt der übertägigen Erkundung nur noch solche Standorte im Verfahren verbleiben sind, welche keine Ausschlusskriterien erfüllen. Ebenso sollen diejenigen Mindestanforderungen, zu denen bereits Aussagen gemacht werden können, erfüllt sein.

Somit müssen folgende Bedingungen für die im Verfahren verbleibenden Standorte gelten:

- Die Überdeckung durch Locker- und Festgestein ist ausreichend, sodass weder durch die erwarteten lokalen Vertikalbewegungen oder glazigene Ereignisse eine Freilegung des ewG stattfinden kann
- Eine ausreichende Entfernung sowohl zu vulkanisch und/oder seismisch aktiven Gebieten (rezent und im Nachweiszeitraum vorhersagbar) ist gegeben
- Der Salzstock ist unverritzt bzw. vorhandene Hohlräume sind vollständig verfüllt und ausreichende Sicherheitsabstände zu bereits vorhandenen Bohrungen oder verfüllten Hohlräumen können eingehalten werden

Um im Rahmen dieser Arbeit eine Vorhersage über die Ausprägung des Salzstocks treffen zu können, müssen mögliche Entwicklungsmöglichkeiten am Standort betrachtet werden. So können verschiedene Szenarien entworfen und deren Bedeutung für die Sicherheit und eine Eignung abgeschätzt werden.

Die folgenden Entwicklungen eines Salzstocks und seiner Umgebung sind möglich und im Rahmen einer Sicherheitsuntersuchung zu betrachten. Es werden die jeweils besten und schlechtesten Entwicklungen aufgezeigt. Die positiven Entwicklungen bzw. Ausprägungen sind mit + und schlechte mit – gekennzeichnet.

- Diapirismus
 - + Abgeschlossen: Das Aufsteigen des Salzes ist beendet. Das kann durch eine zu geringe Mächtigkeit des mobilisierbaren Salzes in der Salzstockbasis oder durch eine Gleichgewichtssituation zwischen dichtebedingtem Salzaufstieg und überlagerten Gesteinseinheiten ausgelöst sein.
 - Andauernd: Das Aufsteigen des Salzes dauert noch an. Die Mächtigkeit der primär abgelagerten Salze ist ausreichend und es hat sich noch keine Gleichgewichtssituation zwischen Aufstieg und überlagernder Masse eingestellt.
- Ausbildung Deckgebirge
 - + Nahezu horizontal und ungestört abgelagert, GW-Nichtleiter durchgehend vorhanden: Die ursprünglich horizontale Ablagerung wurde noch nicht großräumig

durch Einflüsse, wie lokale Spannungseinflüsse, eiszeitliche Ereignisse etc. gestört. Ein oder mehrere GW-Nichtleiter sind durchgängig und ohne Brüche oder Störungen vorhanden. Das Deckgebirge wird zu einem großen Teil aus Festgestein (auch Salz über Oberkante ewG) aufgebaut

- Verstellte Lagerung mit Störungen: die ursprünglich horizontale Ablagerung ist nur noch zum Teil oder nicht mehr vorhanden. Es befinden sich eine oder mehrere Störungen im Deckgebirge, die als Wegsamkeiten fungieren können.
- Überdeckung fehlend oder nur aus Locker-Sedimenten bestehend: Durch die Position des Salzstocks im Untergrund nahe der GOK fehlt eine mächtige Überdeckung. Ein durchgängiger GW-Nichtleiter im Deckgebirge ist nicht vorhanden. Die Sedimente fungieren gegebenenfalls als GW-Reservoir und ein Kontakt zwischen Salzstock und Biosphäre ist möglicherweise vorhanden.
- Erdöl-/Erdgasvorkommen am Salzstock
 - Das den Salzstock unterlagernde Gestein besitzt eine ausreichende Porosität und Permeabilität, um als Speichergestein für Erdöl und/oder Erdgas zu dienen. Der Salzstock dient in diesem System als Abdeckgestein und verhindert ein weiteres Aufsteigen der Kohlenwasserstoffe, welche so als Reservoir in direktem Kontakt mit dem Salzstock an dessen Flanken zu finden sind.
 - Druckgetriebene Infiltration: Der Fluidruck im Reservoir übersteigt den Gebirgsdruck der Salzstockflanken. Es entstehen lokal Wegsamkeiten, durch die Fluide eindringen können.
- Hydrogeologisches System im Deckgebirge (zeitlich begrenzt zu sehen wegen möglicher Veränderung während und nach kaltzeitlicher Ereignisse)
 - + GW-Nichtleiter sind vorhanden: es existieren durchgehende grundwasserundurchlässige Schichten, wodurch die Bewegung des Grundwassers ausschließlich in den dazwischen liegenden Bereichen stattfinden kann und keine Durchmischung möglich ist.
 - + Ausgebildete Salz-/Süßwasserschichtung: Das vorhandene Wasser in den Gesteinseinheiten über dem Salzstock ist salzgestättigt. Es bildet sich eine stabile Schichtung zwischen diesem gesättigten und dem ungesättigten Wasser in den darüber liegenden Schichten aus. Voraussetzung dafür ist ein niedriger Grundwasserzufluss in diesem Bereich.
 - Rezente Subrosion: Es finden rezent Lösungsvorgänge am Salzspiegel durch zufließende ungesättigte Wässer statt.
- Hutgestein
 - + Ausgebildet: Durch Zufluss von ungesättigten Lösungen am Salzspiegel wurde ein Teil des Salzgesteins gelöst. Übrig bleiben schwerlösliche Bestandteile. Je weiter die Subrosion voranschreitet, desto mächtiger bildet sich das Hutgestein aus.

- „altes“ Hutgestein in oder am Salzstock: Hutgestein wurde beispielsweise durch einen weiteren Salzaufstieg oder tektonische Prozesse in seiner Lage verschoben und möglicherweise durch die plastischen Eigenschaften von Salz zum Teil umlagert.
- Fehlend: Es kam durch das Fehlen zufließender ungesättigter Wässer zu keiner Hutgesteinsbildung.
- Ausbildung Salzstock/Salzkern
 - + Symmetrischer Aufbau, Salzkern vorhanden: Der Salzaufstieg erfolgte gleichmäßig und ohne größere tektonische Einflüsse, die Internstruktur ist weitgehend ungestört. Das Salzstockinnere weist einen großräumigen, homogenen Salzkern auf.
 - Unsymmetrischer Aufbau: Die Internstruktur ist kompliziert und die Lagen sind möglicherweise stark verfaltet. Es gibt unter Umständen keinen großräumig ausgebildeten, homogenen Salzkern.
 - Fluid-/Gasvorkommen im Salzstock: KW, CO₂ sowie salinare Fluidvorkommen sind natürliche Bestandteile jeden Salzstocks und können in variierenden Volumina in unterschiedlichen Bereichen des Salzstocks angetroffen werden.

Es ist allerdings auch jede Ausprägung zwischen diesen Extremfällen denkbar. Ebenso können die einzelnen Sachverhalte untereinander in jeder möglichen Ausprägung kombiniert vorkommen. Mindestanforderungen, die sich aus solchen Kombinationen ergeben, sind in Tab. 9 dargestellt.

Tab. 9: Kombinationsmöglichkeiten der FEP-Gruppen

	FEP bzgl. Diapirismus	FEP des Deckgebirges	FEP bzgl. Fluid- /Gasvor- kommen am Salzstock	FEP des hydrogeologischen Systems des Deckgebirges	FEP bzgl. der Ausbil- dung des Salzstocks	FEP des Hutgesteins
FEP bzgl. Diapirismus		Erosion und mögliche Anzahl an Eiszeiten im Nachweiszeitraum darf nicht zur Freilegung des ewG führen. Mögliche induzierte Brüche und Störungen im Deckgebirge dürfen keine durchgängigen Störungen verursachen.		Eine neu induzierte Subrosion am Salzspiegel durch Verschiebung der Salz-/Süßwasserschichtung darf nicht zur Freilegung des ewG führen.		Neu induzierte Hutgesteinsbildung durch Hebung des Salzstocks in Grundwasserniveau darf nicht zur Freilegung des ewG führen.
FEP des Deckgebirges				Subrosion durch zuströmendes Grundwasser und großräumige Strömungszellen aufgrund fehlender, durchgängiger GW-Nichtleiter dürfen nicht zur Freilegung des ewG führen.		

	FEP bzgl. Diapirismus	FEP des Deckgebirges	FEP bzgl. Fluid-/Gasvorkommen am Salzstock	FEP des hydrogeologischen Systems des Deckgebirges	FEP bzgl. der Ausbildung des Salzstocks	FEP des Hutgesteins
FEP bzgl. Fluid-/Gasvorkommen am Salzstock						
FEP des hydrogeologischen Systems des Deckgebirges						Subrosion am Salzstock durch Wegsamkeiten im Hutgestein dürfen nicht zu größeren Lösungserscheinungen und zur Freilegung des ewG führen
FEP bzgl. der Ausbildung des Salzstocks						„altes“ Hutgestein innerhalb des Salzstocks kann eine Wegsamkeit für Fluide darstellen. Dadurch darf keine Gefährdung des ewG, z.B. durch zufließende Lösungen erfolgen.
FEP des Hutgesteins						

4.5 Zur weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchung im zweiten Verfahrensschritt

Während das StandAG die Grundlage für ein Vorgehen zur Auswahl des am besten geeigneten Standortes liefert, geben die Sicherheitsanforderungen des BMU (2010) grundlegende Vorgaben in Bezug auf die Sicherheit für das zukünftige Endlagersystem. Nach dem ersten Verfahrensschritt werden die nach erster Betrachtung verbleibenden Salzstöcke im Rahmen einer übertägigen Erkundung genauer untersucht. Sicherheit im ersten Verfahrensschritt wird durch den Ausschluss ungünstiger Standortregionen erreicht. Ab dem zweiten Verfahrensschritt können für die jeweiligen Standorte weiterführende Sicherheitsuntersuchungen im Rahmen des gewonnenen Kenntnisstandes erstellt werden.

Nach der Durchführung der übertägigen Erkundung im zweiten Verfahrensschritt des StandAG sind erste standortbezogene Daten vorhanden. Durch 3D-seismische Messungen kann ein Abbild der verbliebenen Salzstöcke erzeugt werden. Das heißt, dass Ausdehnung, Mächtigkeit und äußere Form der einzelnen Salzstrukturen in den Grenzen der 3D-Messung bekannt sind. Bei einer gleichmäßigen Antiklinalstruktur des Salzstocks besteht die Möglichkeit, dass der Aufstieg des Salzes ebenfalls gleichmäßig und ungestört erfolgt ist. Die Internstruktur wäre somit zwar im Vergleich zur ursprünglichen Lagerung verstellt, aber die Wahrscheinlichkeit, einen homogenen Salzkern im Inneren vorzufinden, wäre im Vergleich zu sehr unregelmäßigen Salzstöcken oder langgezogenen Salzmauern höher einzuschätzen. Ein homogener Salzkern ist in diesem Fall auch ein Indiz für eine hohe Integrität. Durch Bohrungen, vorzugsweise im Bereich der Flanken oder zukünftiger Schächte, können weitere Aussagen zur Internstruktur und Abschätzungen zur Ausdehnung des Salzkerns getroffen werden.

Ebenso ist allerdings auch trotz gleichmäßiger äußerer Form eine ungeordnete Internstruktur möglich, welche nicht durch die einzelnen Bohrungen erfasst werden konnte. Eine genaue Aussage über den internen Aufbau und einen ausreichend großen Salzkern ist erst mit der untertägigen Erkundung und somit nach dem dritten Verfahrensschritt möglich. Die Erkundungsarbeit im zweiten Verfahrensschritt ermöglicht jedoch bereits eine detaillierte Angabe bzgl. der Umgebung des Salzstocks, sowohl über- als auch untertägig. Eine verlässliche Einschätzung kann ebenso bereits zum Diapirismus (abgeschlossen oder andauernd) gegeben werden. Es können darüber hinaus Aussagen zum strukturellen Aufbau und zu Mächtigkeiten der einzelnen Schichten des Deckgebirges getroffen werden. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Erfassung der Grundwassernichtleiter und eventuell vorhandener Bruch- und Störungszonen. Auch das hydrogeologische System des Deckgebirges wird während der übertägigen Erkundung erfasst. Dazu gehören u. a. Grundwasserzusammensetzung, Fließrichtung, Fließgeschwindigkeit und die Salz-/Süßwassergrenze. Darüber hinaus wird das Hutgestein durchbohrt und kann ebenfalls bezüglich seiner Mächtigkeit, seines strukturellen Aufbaus (Störungen, Hohlräume etc.)

und seiner Zusammensetzung beschrieben werden. Im Hinblick auf mögliche Kohlenwasserstoffreservoirs am Salzstock können gegebenenfalls bereits vorhandene Informationen, beispielsweise aus Erkundungsvorhaben, bestätigt oder verworfen werden. Geht man wiederum von den durch die Kommission vorgegebenen Schritten einer Sicherheitsuntersuchung aus, ergeben sich folgende Aspekte:

1. Erstellung eines Sicherheits- und Nachweiskonzepts

Ähnlich wie bei der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung nach dem ersten Verfahrensschritt, kann auch hier die VSG als Grundlage genommen werden. Im Rahmen der Erkundung des Salzstocks Gorleben wurde ebenfalls eine detaillierte übertägige Erkundung durchgeführt, die in das in der VSG beschriebene Sicherheits- und Nachweiskonzept eingeflossen ist. Allerdings sollte angemerkt werden, dass die Erstellung der Sicherheitsuntersuchung in einem zukünftigen Auswahlverfahren auch den Stand von Wissenschaft und Technik erfüllen und dementsprechend weiterentwickelt bzw. angepasst werden muss. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf mögliche anforderungsorientierte Neu- oder Weiterentwicklungen zum Beispiel zur effizienteren Umsetzung von Anforderungen zur Rückholbarkeit und Bergbarkeit (vgl. ESK 2016b).

2. Erstellung eines (vorläufigen) Endlagerkonzepts

Sollte aus geologischen oder organisatorischen Gründen noch kein Endlagerkonzept gewählt worden sein, kann nun möglicherweise die Festlegung auf ein Konzept erfolgen. Diese Entscheidung wird unter Umständen durch die fehlende Möglichkeit der Umsetzung beider Konzepte an einem Standort erfolgen. Sind aufgrund der ausreichend vorhandenen räumlichen Ausdehnung des Salzkerns noch beide Konzepte möglich, könnte eine endgültige Entscheidung aus geologischen Gesichtspunkten grundsätzlich nach dem dritten Verfahrensschritt getroffen werden. Es muss eine Abwägung stattfinden, ob die Möglichkeit der Realisierung beider Konzepte so lange wie möglich erhalten bleiben soll oder ob die untertägige Erkundung (Lage und Tiefe der Bohrungen, Lage und Ausdehnung des Erkundungsbergwerks, die Sicherheitsuntersuchung usw. zielgerichtet auf ein Konzept ausgelegt sein muss.

3. Geowissenschaftliche und klimatische Langzeitprognose

Die geowissenschaftliche und klimatische Langzeitprognose wurde bereits im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung nach dem ersten Verfahrensschritt erstellt und die darin getroffenen Aussagen haben während des gesamten Verfahrens Bestand. Allerdings können durch die gewonnenen Daten aus der übertägigen Erkundung möglicherweise bestimmte Aspekte überprüft und detaillierter betrachtet werden. Grundsätzlich gilt für die Sicherheitsuntersuchung auch im zweiten Verfahrensschritt, dass der ewG den Schutz des eingelagerten Inventars im Nachweiszeitraum bietet. Um einen Standort in Hinblick auf die Sicherheit beurteilen zu können, muss wiederum die Überlegung erfolgen, welche Gegebenheiten am Standort bzw. welche Entwicklungen zu einer Gefährdung des ewG führen können. Eine Einschränkung ist durch die fehlende untertägige Erkundung gegeben.

4. Wahrscheinlichkeit möglicher Freisetzungseignisse

Nach der übertägigen Erkundung können erste Freisetzungsrechnungen im Rahmen der gewonnenen Erkenntnisse durchgeführt werden. Das heißt, dass Berechnungen zu Freisetzungen bzw. Freisetzungspfaden und Ausbreitungsgeschwindigkeiten zumindest für das Deckgebirge und die erkundete Umgebung des Salzstocks (Flankenbereiche) durchgeführt werden können. Als Eingangsparameter („Quellterm Endlagerbergwerk“) können Daten aus der VSG verwendet werden, in der ebenfalls solche Berechnungen für den Salzstock Gorleben durchgeführt wurden. Soweit Abweichungen zur VSG aus den übertägigen Erkundungen bekannt sind, können diese zur Anpassung der Eingangsparameter der Freisetzungsrechnungen dienen. Das heißt auch, dass nun eine Vorstellung für die Entwicklungen des Endlagersystems und seiner Sicherheitsfunktionen im Nachweiszeitraum besteht, sowohl beeinflusst durch die Auffahrung eines Endlagers, die Einbringung von Abfällen wie auch durch klimatische Prozesse. Aus den beeinflussenden Faktoren (FEP) können nun Szenarien – im Rahmen der zugrunde liegenden Informationen und Daten – entwickelt werden.

Eine Übersicht über die sicherheitsrelevanten Sachverhalte, welche durch die übertägige Erkundung detaillierter erfasst werden können, die daraus folgenden Kriterien sowie die Bedeutung der Inputdaten für die Sicherheitsuntersuchung werden in Tab. 10 dargestellt. Hierbei soll die Spalte bezüglich der Bedeutung der Inputdaten eine Empfehlung darstellen, wie in einer Sicherheitsuntersuchung vorgegangen werden kann bzw. welche Untersuchungsmöglichkeiten weiterentwickelt werden sollten.

5. *Ungewissheiten und Sicherheitsreserven*
6. *Erkundungs- und FuE-Bedarf, Optimierungsmöglichkeiten*

Einschätzungen zu Ungewissheiten bezüglich der Gegebenheiten am Standort und möglicher Entwicklungen werden in Tab. 11 vorgestellt. Diese Ungewissheiten können zum Teil durch weitere Erkundungsmaßnahmen oder Forschungs- und Entwicklungsarbeiten verringert werden oder ihnen muss mit Optimierungen bzw. Sicherheitsreserven im Endlagerkonzept entgegengewirkt werden (Tab. 11).

Tab. 10: Übersicht über die im zweiten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte, daraus folgender Kriterien und Sicherheitsbewertungen

Gegebenheit am Standort	Sicherheitsbewertung (ebenfalls in Hinblick auf mögliche Kombinationen mit anderen Gegebenheiten) Ausschlusskriterien/ Abwägungskriterien	Bedeutung der gewonnen Inputdaten für die Sicherheitsuntersuchung
Diapirismus	<p>Ein andauernder Diapirismus stellt einen zusätzlichen Faktor bei der Berechnung der Netto-Abtragungsrate dar. Entsprechende Berechnungen zur Netto-Abtragungsrate sind als Bestandteil der Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen.</p> <p>→ Abschätzung für jeden Standort nötig: Gegebenheiten am Standort können u. U. durch die Gefahr der Freilegung zum Ausschluss führen (Nachweiszeitraum 1 Mio. Jahre)</p> <p>→ Abwägung: Je mehr Überdeckung, v. a. mit Festgestein, desto besser</p> <p>→ Abwägung: Standort mit abgeschlossenen Diapirismus oder mit geringen Bewegungsraten ist zu bevorzugen</p>	<p>Mögliche Aufstiegsraten des Salinars können durch die übertägige Erkundung ermittelt werden. Ebenso kann durch die 3D-Seismik möglicherweise eingeschätzt werden, ob der Salzstock noch in Verbindung mit seiner Basis steht.</p> <p>Der Diapirismus und alle mit ihm in Verbindung stehenden Auswirkungen können also nach der übertägigen Erkundung abgeschätzt werden. Entsprechende Berechnungen sind als Bestandteil der Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen.</p>

<p>Deckgebirge</p> <p>(vermutlich stark beeinträchtigt durch kaltzeitliche Ereignisse, d.h. Aussagen dazu zeitlich begrenzt)</p>	<p>Eine negative Beeinflussung des ewG, bis hin zur Freilegung oder Bildung von Wegsamkeiten, kann durch eine ausreichende Überdeckung be- oder verhindert werden. Entsprechende Berechnungen zur Netto-Abtragsrate sind als Bestandteil der Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Einschätzung der Deckgebirgssituation und der Barrierenwirkung gegenüber kaltzeitlichen Ereignissen für jeden Standort gesondert durchzuführen → Abschätzung/Bewertung der Gefährdung möglicher Wegsamkeiten und Fluidzufluss zum Salzstock bei Brüchen und Störungen im Deckgebirge nötig → Abwägung: Ein Standort mit ausgebildetem Deckgebirge und durchgehenden GW-Nichtleitern ist zu bevorzugen. Auch das Fehlen von durchgängigen Störungen ist im Standortvergleich als positiv zu bewerten. → Abwägung: Je mehr Überdeckung, v. a. mit Festgestein, desto besser 	<p>Der Aufbau und die Mächtigkeit des Deckgebirges sind nach der übertägigen Erkundung genau bekannt. Ebenso können durch die seismischen Messungen größere Störungssysteme und Brüche identifiziert werden.</p> <p>Mit Hilfe der Abschätzung der Netto-Abtragsrate kann eine Eignung des Standortes in Hinblick auf dessen Deckgebirge als Schutzbarriere gegen eine mögliche Freilegung des ewG gegeben werden.</p>
<p>Fluid-/Gasvorkommen am Wirtsgestein</p>	<p>Mögliche Bildung von Wegsamkeiten in den Salzstock (hydraulischer Druck der Lagerstätte höher als Gebirgsdruck) sind lokal in den Flankenbereichen begrenzt.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Auswirkung möglicher Infiltration durch den erhöhten Lagerstättendruck in den Flankenbereichen muss während der Planungsphase beachtet werden → Abschätzung der möglichen Beschädigung der Flankenbereiche notwendig → Abschätzung des generellen Potentials für KW-Lagerstätten nötig, beispielsweise Fallenstruktur in Form eines Überhanges im Flankenbereich notwendig → Abwägung: Ein Standort ohne nachgewiesenes KW-Reservoir ist zu bevorzugen, da weder Konflikte mit Erdöl-/Erdgasförderprogrammen zu erwarten sind und eine Infiltration des Salzstocks durch KW aus diesem Reservoir nicht stattfindet 	<p>Das Vorhandensein von Fluid-/Gasvorkommen am Salzstock ist eventuell durch bereits vorhandene Dokumentationen bzgl. Erkundungen/ Prospektionsvorhaben zur Erdöl-/ Erdgaslagerstätten bekannt oder vermutet (erster Verfahrensschritt).</p> <p>Tiefergehende Bohrungen im Rahmen der übertägigen Erkundung können Aufschluss über ein mögliches Reservoir geben.</p> <p>Eine Eignung des Salzstocks als Fallenstruktur (Überhang an der Flanke etc.) kann durch die 3D-Seismik erkannt werden.</p>

<p>Hydrogeologisches System des Deckgebirges</p> <p>(vermutlich stark beeinträchtigt durch kaltzeitliche Ereignisse, d.h. Aussagen dazu zeitlich begrenzt)</p>	<p>Eine Freilegung/ Schädigung des ewG durch Ablaugungsprozesse muss vermieden werden. Entsprechende Berechnungen zur Netto-Abtragsrate sind als Bestandteil der Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Abschätzung einer möglichen Ablaugung ist für jeden Standort notwendig → Ausschluss von Standorten bei möglicher Freilegung des ewG (hier v. a. durch sog. Ablaugung) → Abwägung: Standorte mit ausgeprägter Salz-/Süßwasser-Schichtung und ausgebildetem GW-Nichtleiter sind zu bevorzugen, da sie auf eine geringe oder nicht vorhandene Fließbewegung hindeuten 	<p>Durch die übertägige Erkundung ist das hydrogeologische System (Zusammensetzung, Fließrichtung/-geschwindigkeit etc.) sehr genau bekannt und eine Abschätzung der Gefährdung durch Subrosion kann gegeben werden.</p> <p>Allerdings ist das hydrologische System in dieser Ausprägung nur bis zum Einsetzen einer Kaltzeit in dieser Form vorhanden.</p>
<p>Ausbildung Salzstock</p>	<ul style="list-style-type: none"> → Ausschluss von Salzstöcken bei nicht ausreichendem Salzkernvolumen → Abwägung: Salzstöcke mit großem Quererstreckung, symmetrischen Flanken und gleichmäßiger Antiklinalform und ohne Überhangstrukturen sind zu bevorzugen, da sie möglicherweise auf einen ungestörten und ausreichend mächtigen Steinsalz Kern hindeuten. → Abwägung: Je mehr Volumen, desto besser 	<p>Der Durchmesser der Salzstöcke Norddeutschlands ist im Vorfeld in etwa bekannt und kann durch seismische Messungen bestätigt werden. Eine Abschätzung der Situation innerhalb des Salzstocks findet durch wenige Bohrungen statt.</p> <p>Eine detaillierte Aussage zum Vorhandensein eines homogenen Salzkerns und dessen Ausdehnung ist erst nach Erkundung von untertage möglich!</p>
<p>Hutgestein</p> <p>(eventuell beeinträchtigt durch kaltzeitliche Ereignisse, d.h. Aussagen dazu zeitlich begrenzt)</p>	<p>Vermeidung einer Freilegung/ Schädigung des ewG durch Subrosion. Möglichkeit eines „alten“ Hutgesteins am oder im Salzstock muss während der gesamten Planungsphase beachtet werden. Eine Untersuchung des Hutgesteins auf durchgehende Störungen und somit von potentiellen Wegsamkeiten bis zum Salzstock muss durchgeführt werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Abschätzung der Mächtigkeit und der Struktur des Hutes für jeden Salzstock nötig. Die Bedeutung von Hohlräumen im 	<p>Mächtigkeit und Ausbildung des Hutes kann durch Bohrungen während der übertägigen Erkundung erfasst werden. Somit kann auch die Schutzfunktion des Hutgesteins gegenüber Subrosion und einer möglichen Freilegung des Salzstocks durch Erosion bei der Abschätzung der Netto-Abtragsrate bewertet werden.</p>

	<p>Hutgesteinsbereich im Rahmen der Erkundung bzw. bei Bohrungen muss beachtet werden.</p> <p>→ Abwägung: je mächtiger das Hutgestein, desto besser</p> <p>→ Abwägung: Salzstöcke mit ausgebildetem Hutgestein sind zu bevorzugen, da dieses zusätzlichen Schutz vor Subrosion bietet.</p>	
--	--	--

Tab. 11: Übersicht über die im zweiten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte, die diesbezüglich bestehenden Ungewissheiten, Sicherheitsreserven, den Erkundungs- und FuE-Bedarf sowie mögliche Optimierungsmöglichkeiten

Gegebenheit am Standort	Ungewissheiten	Erkundungs- und FuE-Bedarf	Optimierungsmöglichkeiten und Sicherheitsreserven
Diapirismus	<p>Einschätzungen bzgl. eines abgeschlossenen oder andauernden Diapirismus werden z.B. anhand von Hebungsdaten, Ausprägung des Hutgesteins, Grundwasserschichtung und der Salzstockbasis gemacht. Die momentane Situation kann allerdings nicht für den Nachweiszeitraum als konstant angenommen werden. So kann ein erneuter Aufstieg beispielsweise durch eine Eiszeit bzw. den Rückzug eines Gletschers ausgelöst werden. Eine Vorhersage über die Entwicklung über den Nachweiszeitraum ist nicht sicher möglich.</p>	<p>Der Diapirismus am Standort kann durch die durchgeführten Erkundungsmethoden nach der übertägigen Erkundung bereits gut eingeschätzt werden.</p>	<p>Die Sicherheitsbarrieren bzw. –reserven können an die Ausprägung des Diapirismus angepasst werden.</p>

Deckgebirge	<p>Der Aufbau des Deckgebirges sowie vorhandene Störungszonen können durch die übertägige Erkundung sehr gut erfasst werden. Allerdings werden Bereiche zwischen den Bohrungen modelliert, ergänzt durch seismische Messmethoden. Es ist daher möglich, dass kleinräumige Strukturen übersehen oder fehlinterpretiert werden.</p> <p>Hierbei ist anzumerken, dass sich Struktur und Aufbau des Deckgebirges mit Einsetzen einer Kalt- oder Eiszeit ändern wird.</p>	<p>Je mehr Bohrungen durchgeführt werden, desto detaillierter und verlässlicher ist die Beschreibung des Deckgebirges. Allerdings stellen Bohrungen gleichzeitig Schwächezonen dar und müssen verfüllt werden. Es muss also eine Abwägung zwischen Detailgrad der Erkundung und der Schädigung des Deckgebirges durch Bohrungen stattfinden.</p> <p>Hier soll nochmal auf die Bedeutung der 3D-Seismik für die Modellierung (Verlauf, Ausdehnung) von Störungszonen und somit möglichen Wegsamkeiten hingewiesen werden.</p>	<p>Die Erkundungsmethoden werden konstant weiterentwickelt und somit optimiert. Den Ungewissheiten bei der Interpretation der seismischen Messergebnisse kann mit Sicherheitsreserven entgegengewirkt werden, wenn eine detailliertere Erkundung nicht möglich ist oder aus Überlegungen zum Erhalt eines möglichst unbeschädigten Deckgebirges nicht durchgeführt wird.</p>
Fluid-/Gasvorkommen am Wirtsgestein	<p>Die Verlässlichkeit der Aussage über KW-Vorkommen am Salzstock hängt von der zu Grunde gelegten Datenlage ab und ist daher als sehr variabel zu erwarten.</p> <p>Das Potential eines Salzstocks als Fallenstruktur kann anhand dessen Umriss abgeschätzt werden (Überhang im Flankenbereich).</p>	<p>Sollte noch keine Dokumentation des Salzstocks im Rahmen einer vorangegangenen Erkundung vorliegen, kann das Vorhandensein von KW-Reservoirs durch tiefreichende Bohrungen überprüft werden.</p> <p>Im Rahmen einer übertägigen Erkundung sind nur wenige solcher tiefreichenden Bohrungen geplant. Sollte bzgl. eines KW-Vorkommens Unklarheiten bestehen, müssten diese im Rahmen der untertägigen Erkundung nachgeholt werden.</p>	<p>Mögliche Bildung von Wegsamkeiten und das Eindringen von KW in den Salzstock (hydraulischer Druck der Lagerstätte höher als Gebirgsdruck) sind lokal in den Flankenbereichen begrenzt. Die Sicherheitsbarrieren und –reserven zum Nebengebirge sind daran anzupassen.</p>

Hydrogeologisches System des Deckgebirges	<p>Der Aufbau und die strukturellen Gegebenheiten des Deckgebirges können durch Bohrungen sehr genau erfasst werden. Gleiches gilt für die hydrologischen Verhältnisse.</p> <p>Hierbei soll angemerkt werden, dass sich auch die hydrologischen Verhältnisse mit Einsetzen von Kalt- oder Eiszeit Änderungen unterliegen werden.</p>	<p>Je mehr Bohrungen ins Deckgebirge abgeteuft werden, desto genauer kann auch das hydrogeologische System erfasst werden. Es muss also eine Abwägung zwischen Detailgrad der Erkundung und der Schädigung des Deckgebirges durch Bohrungen stattfinden.</p>	<p>Sicherheitsreserven müssen v.a. an die Überlegungen und Auswirkungen der eiszeitlichen Prozesse (Abtragungsrate Gletscher, Subrosion etc.) angepasst werden.</p>
Ausbildung Salzstock	<p>Die Ausdehnung und Mächtigkeit eines Salzstocks kann durch seismische Messmethoden gut erfasst werden. Allerdings unterliegt die Auswertung seismischer Messungen einem Interpretationsspielraum. Es kann auch eine erste Abschätzung zum Internbau gegeben werden. Auch diese ist mit sehr großen Unsicherheiten behaftet.</p>	<p>Um eine räumliche Ansicht des Salzstocks gewinnen zu können, ist eine 3D-Seismik von zentraler Bedeutung. Die Ergebnisse können durch tiefreichende Bohrungen lokal überprüft werden.</p> <p>Verlässliche Aussagen zum internen Aufbau des Salzstocks sind erst nach Erkundung von untertage möglich.</p>	<p>Die Methoden zur Aufnahme und Auswertung seismischer Messungen werden konstant weiterentwickelt und somit optimiert. Den Ungewissheiten bei der Interpretation der seismischen Messergebnisse, auch in Hinblick von ersten Überlegungen bzgl. Endlagerkonzepten, kann mit Sicherheitsreserven entgegengewirkt werden.</p>
Hutgestein	<p>Das Vorhandensein und der Aufbau eines Hutgesteins werden durch Bohrungen überprüft.</p> <p>Hierbei soll angemerkt werden, dass sich auch die Ausbildung des Hutgesteins mit Einsetzen von Kalt- oder Eiszeit ändern kann.</p>	<p>Auch hier wird eine höhere Messdichte und Verlässlichkeit der Aussagen durch mehr Bohrungen erreicht. Allerdings stellt das Hutgestein eine Schutzbarriere gegen Lösungsprozesse dar. Es muss also auch in diesem Fall eine Abwägung zwischen Detailgrad der Erkundung und der Schädigung des Deckgebirges durch Bohrungen stattfinden.</p>	<p>Sicherheitsreserven müssen v.a. an die Überlegungen und Auswirkungen der eiszeitlichen Prozesse (Abtragungsrate Gletscher, Subrosion etc.) angepasst werden.</p>

5 Standortauswahlgesetz – § 18: Untertägige Erkundung

Nach § 17 Abs. 1 StandAG überprüft das BfE die Standortauswahl für die untertägige Erkundung und die für die Standorte zugehörigen weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Die Entscheidung um die Standorte für die untertägige Erkundung wird schließlich nach Prüfung durch das BMUB durch Bundesgesetz beschlossen (§ 17 Abs. 2 StandAG). Sie soll laut § 17 Abs. 5 StandAG bis Ende 2023 getroffen sein.

Das BfE legt laut § 18 Abs. 2 StandAG das Erkundungsprogramm und die standortbezogenen Prüfkriterien für die vertiefte geologische Erkundung fest, welche vorher nach § 18 Abs. 1 StandAG vom Vorhabenträger vorgeschlagen wurden. Der Vorhabenträger führt nach § 18 Abs. 3 StandAG die untertägige Erkundung durch und erstellt auf der Basis der standortbezogenen Prüfkriterien sowie der festgelegten Kriterien und Anforderungen (von der Kommission nach § 4 Abs. 5 StandAG festgelegt) eine umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchung sowohl für die Betriebs- als auch die Nachbetriebsphase. Die Ergebnisse werden dem BfE übermittelt, das daraufhin eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchführen muss (§ 18 Abs. 4 StandAG).

5.1 Durchführung der untertägigen Erkundung

Für eine untertägige Erkundung müssen ein Erkundungsbergwerk und/oder ein Untertagelabor aufgefahren und weitere tiefreichende Bohrungen abgeteuft werden. Dieses Vorgehen ist notwendig, um alle wichtigen standortspezifischen geowissenschaftlichen Gegebenheiten zu erfassen und so eine umfassende Aussage zu Integrität bzw. Einschlussvermögen des ewG für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre treffen zu können. Darüber hinaus liefern diese Untersuchungen im besten Fall all jene Daten, welche für eine vollständige Sicherheitsanalyse am jeweiligen Standort benötigt werden und die nach der übertägigen Erkundung noch nicht erhoben werden konnten. Das Vorgehen bei der untertägigen Erkundung muss sich also sowohl nach dem Wirtsgesteinstyp als auch nach den noch fehlenden Daten für den geforderten Langzeitsicherheitsnachweis richten.

Allerdings ist durch die Auffahrung eines untertägigen Bereichs bzw. ein standortspezifisches URL die gewünschte Unversehrtheit des Wirtsgesteinskörpers nicht mehr gegeben. Die geologische Barriere, der je nach Wirtsgestein bzw. gewählten Konzept eine entscheidende Rolle beim Nachweis des sicheren Einschlusses zukommt, kann dadurch nachhaltig geschwächt oder geschädigt werden. Darüber hinaus kann es unter Umständen zu einem „Verbrauchen“ bzw. unwiderruflichen Schädigung von später benötigten Sicherheitsbereichen/ -reserven kommen.

Folgende Aussagen wurden von BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) zur untertägigen Erkundung in Salzformationen getroffen:

Die hydrogeologischen Untersuchungen beschränken sich auf das Deck- und Nebengebirge. Im Wirtsgestein selbst sind solche Messungen von untergeordneter Bedeutung, da im Steinsalz keine advektiven Transporte stattfinden. Dafür sind hier Untersuchungen zu den verschiedenen Salinarstrukturen und dem internen Aufbau des Salzstocks entscheidend. Als grundsätzliche Erkundungsziele werden folgende genannt:

- Umfassende Beschreibung des Wirtsgesteins und seiner stofflichen Eigenschaften, sowohl mechanisch als auch mineralogisch und strukturell
- Beschreibung der geologischen Struktur des Wirtsgesteins, d.h. Kartierung von Störungen, Klüften, inhomogenen Bereichen etc.
- Bestimmung der relevanten Vorgänge in und um den ewG, d.h. mögliche Deformationen, Ausbreitung der Wärme, Einfluss von Wärme auf das Wirtsgestein, Spannungsfeld
- Untersuchung der Faktoren im Falle einer Radionuklidfreisetzung, z.B. geochemische und physikalische Parameter
- Analyse des Spannungsfeldes

Darüber hinaus soll von der Autorin folgendes Erkundungsziel ergänzt werden:

- Beurteilung der vorhandenen Lösungen hinsichtlich ihrer Herkunft

BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) erklären, dass darüber hinaus Untersuchungen nötig sind, welche sich auf das Endlagerkonzept beziehen und die dieses in einem realen Maßstab testen sowie optimieren sollen. Des Weiteren kann so überprüft werden, ob das Endlagerkonzept in seiner geplanten Form technisch machbar ist. Zu diesen Untersuchungen gehören:

- Überprüfung der Machbarkeit, Stabilität und Interaktion der technischen, geologischen und geotechnischen Barrieren sowie deren Einschlussvermögen gegenüber Gasaustritt/-zutritt, Rückhaltevermögen von Radionukliden etc. Gegebenenfalls Weiterentwicklung und Optimierung der Barrieren
- In-situ Versuche bezüglich Endlagerkonzept, Barrieren, Streckenauffahrung, Spreng- und Bohrtechniken etc.
- Anwendung der Techniken und des Vorgehens während der Einlagerung unter realen Bedingungen
- Gegebenenfalls Optimierung der Vorgehensweise während der Erkundung und der Standortüberwachung (während Auffahrung, Betrieb und Nachbetrieb)

Nach Meinung der Autorin sind die oben genannten Punkte Teil von Untersuchungen in einem URL. Laut NEA (2013b) können solche URLs sowohl an dem im Standortauswahl verbliebenem

Standort oder an einem alternativen Standort, der gleiche physikalische, chemische und mechanische Eigenschaften aufweist; dieser kann dann für die Entwicklung von Technologien und für Untersuchungen, ggf. auch in internationaler Zusammenarbeit, genutzt werden.

In BORNEMANN ET AL. (2008) wird beschrieben, welche Untersuchungen im Rahmen der untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben durchgeführt wurden:

- Geologische Kartierung der anstehenden Salinarbereiche, die während der Schachtvorstöße freigelegt wurden, in Bezug auf deren tektonische und sedimentäre Strukturen, wie Klüfte, Störungszonen, Schichtgrenzen, Umkristallisationsbereiche
- Geologische Kartierung der anstehenden Salinarbereiche, die während der Auffahrung freigelegt wurden. Lokal Detailkartierungen von Zonen mit markanten Strukturen, wie Störungen, Klüfte, Faltenachsen, Schicht- und Schieferungsflächen, Sekundärmineralisationen etc.
- Kartierungen der Sohlen in bestimmten Bereichen des Hutes und des Salzgesteins, u. a. auch mit fotografischen Belegen
- Erkundungsbohrungen untertage für Informationen zum Verlauf der Salzstockflanken, Schichtgrenzen, Ausdehnung des Salzkerns sowie zur strukturellen und geologischen Situation
- Messung des Bromidgehalts zum besseren Verständnis der stratigraphischen Entwicklung des Salzstocks. So können auch tektonische Vorgänge wie Verfaltung der Gesteinsschichten und Entwicklung der Lagerungsverhältnisse abgeleitet werden
- Kartierung der Bereiche mit Auftreten von Kohlenwasserstoffen, u. a. durch Verwendung von UV-Licht. Einteilung in sichtbare Vorkommen in Form von feuchten Bereichen am Stoß (stark oder schwach sichtbar) und fluoreszierenden Vorkommen (stark oder schwach fluoreszierend)
- Elektromagnetische Reflexionsmessungen (EMR) zur Detektion von geoelektrischen Abweichungen in Form von lithologischen Schichtgrenzen oder sonstigen Heterogenitäten, wie Feuchtzonen, Anreicherung von Tonsilikaten etc. Die Reichweite der Messmethode ist abhängig von der Messfrequenz und kann mehrere hundert Meter betragen
- Kartierung von Gasvorkommen sowie Vorkommen von Salzlösungen im Wirtsgestein

Die geotechnische Erkundung des Salzstocks Gorleben wird in einem Bericht von BRÄUER ET AL. (2012) zusammengefasst und beschrieben. Folgende Untersuchungen wurden demnach im Rahmen der Geotechnik durchgeführt:

- Seismologische Untersuchungen zur genauen Beschreibung der seismischen Situation und einer möglichen Gefährdung durch Erdbeben

- Bestimmung der Temperatur untertage und deren Entwicklung während Auffahrung, Erkundung und Betrieb
- Untersuchung des Spannungsfeldes untertage und deren Veränderungen durch Bergbau und thermischer Veränderung
- Hydraulische Untersuchung des Salzgesteins und Ermittlung von isolierten Flüssigkeitsvorkommen
- Verformungsmessungen innerhalb des Salinars, ausgelöst durch Bergbau und thermische Veränderung
- Geomechanische Laboruntersuchung zur genaueren Untersuchung der thermomechanischen Kennwerte und der Mineralogie. Weiter die Erstellung eines Stoffmodells zur Verdeutlichung der Veränderung des Salinars auf thermomechanische Beanspruchung

5.2 Geowissenschaftliche Sachverhalte und geeignete Erkundungsergebnisse

Die grundlegenden Erkenntnisse aus der übertägigen Erkundung werden durch die Untersuchungen und detaillierten Informationen der untertägigen Erkundung ergänzt. Nach KOCK ET AL. (2012) sind folgende Prozesse entscheidend in Hinblick auf die Integrität des ewG:

- Überschreiten der Dilatanzgrenze: Durch die Auffahrung eines Bergwerks kann die Salzbarriere mechanisch geschädigt werden. Diese Auflockerungszone (EDZ) ist allerdings räumlich begrenzt und erstreckt sich lediglich ins Nahfeld (dm bis m)
- Spannungsumlagerung: Aufgrund thermisch induzierter Beanspruchung finden eine Ausdehnung sowie eine Hebung des Gebirges statt. Wie stark sich die konvergenz- und thermomechanischen Einflüsse auswirken, hängt von der Ausdehnung der Einlagerungskammer bzw. des Einlagerungsfeldes und der Stärke der Temperaturerhöhung ab. Die Folge sind mechanische Schädigungen, wenn die Dilatanzgrenze überschritten wird. Diese Einwirkung auf die Barriereneigenschaft ist weitreichend und betrifft das Fernfeld (10 m bis mehrere 100 m)

Hieraus wird deutlich, dass die Eigenschaften des Salinargesteins und seine Reaktion auf äußere Einflüsse, wie Wärmeeintrag oder die Schaffung von Hohlräumen, bekannt sein müssen. Dies bezieht sich nicht nur auf den momentanen Zustand, sondern muss auch zeitabhängig betrachtet und gegebenenfalls untersucht werden. Von grundsätzlicher Bedeutung für die Möglichkeit der Festlegung eines ewG sind hierbei der homogene Steinsalz Kern und die Kenntnis der Lagerungsverhältnisse und der räumlichen Ausdehnung anderer Gesteinseinheiten sowie derer geochemischen Eigenschaften. Durch die untertägige Erkundung der verbleibenden Standorte oder einer Auswahl aus diesen, sollen folgende Gegebenheiten evaluiert werden:

Geologische Standorterkundung und geomechanische in-situ-Versuche

BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) erklären, dass untertage eine geologische Kartierung erfolgen muss, um eine vollständige Dokumentation der Standortgegebenheiten zu erhalten. Somit können detaillierte Angaben zu strukturellen Gegebenheiten und Charakteristika des Wirtsgesteins gemacht werden. Darüber hinaus können ungeeignete Bereiche, wie z.B. Auflockerungsbereiche oder Anhydritlagen, identifiziert werden (BOLLINGERFEHR ET AL. 2011). Die Kartierung wird ergänzt durch Bohrkern, lokale Probenahmen sowie photographische Aufnahmen. Durch anschließende und ergänzende Laboruntersuchungen können die genommenen Proben mineralogisch, petrographisch und geochemisch charakterisiert werden (BOLLINGERFEHR ET AL. 2011). Anhand der gewonnen Daten können geologische Karten und Schnitte sowie ein 3D-Modell erstellt werden. Bei neuen Erkenntnissen während der Erkundung werden die Karten und Modelle aktualisiert und ergänzt (BOLLINGERFEHR ET AL. 2011).

Laut BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) werden geomechanische Messungen zum Verständnis der primären Spannungssituation im Gestein bzw. zur Detektion von Änderungen des Spannungszustandes eingesetzt. Somit können beispielsweise Aussagen zum Verformungsverhalten des Wirtsgesteins gemacht werden. Mit Hilfe dieser Daten kann wiederum das Endlagerkonzept weiter geplant und die Einschlusswirksamkeit der geologischen Barriere eingeschätzt werden (BOLLINGERFEHR ET AL. 2011). Des Weiteren sollen laut BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) Abschätzungen zum Einfluss des geplanten Endlagerbergwerks auf Barrieren (Deformation, Spannungen etc.), den Spannungszustand und zur Standsicherheit allgemein getroffen werden. Für eine vollständige Untersuchung empfehlen BOLLINGERFEHR ET AL. (2011), ebenso wie am Standort Gorleben durchgeführt (BRÄUER ET AL. 2012), die Bestimmung felsmechanischer Eigenschaften, wie Konvergenz oder Kriechverhalten. BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) weisen darauf hin, dass die geotechnischen Messungen über die Erkundung hinaus als wiederholte Messungen oder als Dauermessstationen eingerichtet werden sollen.

Laut BRÄUER ET AL. (2012) wurden im Rahmen der Erkundung des Salzstocks Gorlebens Kurzzeit- und Langzeitspannungsmessungen sowie Verformungsmessungen durchgeführt. Lokal wurde zusätzlich das Gebirgsverformungsverhalten gemessen, um die elastischen Verformungseigenschaften des Salinars zu bestimmen. Während die Kurzzeitspannungsmessungen den primären Spannungszustand im Salinar bestimmen sollen, dienen die Langzeitmessungen der Ermittlung von Spannungsänderungen während der Erkundung durch Auffahrung von Hohlräumen und Betrieb untertage (BRÄUER ET AL. 2012). So können standortspezifische und detaillierte Messwerte erfasst und das Salinar in seinem Verhalten beschrieben werden. Diese Kennwerte sind u. a. wichtige Eingangsparameter für Sicherheitsanalysen.

Für die Gebirgsverformungsmessungen wurden nach BRÄUER ET AL. (2012) beispielsweise Extensometermessungen durchgeführt. Mit dieser Methode kann eine Veränderung des Abstands zwischen zwei Punkten auf einer Achse erfasst werden. Anders gesagt können so Verschiebungen von Gebirgsbereichen gemessen werden. Außerdem wurden Konvergenzmessungen⁶, Inklinometermessungen⁷ und Fissurometermessungen⁸ durchgeführt (BRÄUER ET AL. 2012).

Hydrogeologische/hydraulische in-situ-Untersuchungen

Die Untersuchungsziele von hydrogeologischen und hydrochemischen Messverfahren bilden nach BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) zum einen die Auswertung der hydraulischen Eigenschaften im ungestörten Wirtsgestein und zum anderen die hydraulischen Eigenschaften in Kluft- und Störungssystemen wie auch in Auflockerungszonen (Nahbereich Hohlräume). Auch die Identifizierung möglicher Transportpfade und Rückhaltemechanismen bei einer Radionuklidfreisetzung sollen betrachtet werden. Auf dieser Basis können Modelle zur hydrogeologischen Situation am Standort und zu möglichen Grundwasserbewegungen erstellt werden (BOLLINGERFEHR ET AL. 2011).

Nach BRÄUER ET AL. (2012) ist die Undurchlässigkeit von Salinargesteinen auf fehlende Vernetzung des vorhandenen Porenraumes zurückzuführen. Lokal können diesbezüglich aber auch im Salzgestein Ausnahmen bestehen. Anhydritgestein beispielsweise ist in der Regel in allen Salzstöcken anzutreffen und ist in sich geklüftet (BRÄUER ET AL. 2012).

In der Arbeit von GHANBARZADEH ET AL. (2015) wird sogar davon ausgegangen, dass Steinsalz ab einer gewissen Teufenlage permeable Eigenschaften zeigt; dies wird begründet durch die Porenraumgeometrie eines Gesteins, die sich aus der Benetzung der Kornoberflächen ergibt. Demnach soll nach GHANBARZADEH ET AL. (2015) ein Öffnungswinkel von $< 60^\circ$ zur Ausbildung eines stabilen Netzwerkes mit lösungsgefüllten Verbindungen entlang der Korngrenzen führen; diese Anordnung wäre bei circa 3-4 km Teufe realisiert. Eine Stellungnahme der DAEF (2016) zu diesem Artikel erklärt allerdings, dass die Versuchsanordnung von GHANBARZADEH ET AL. (2015) nicht den natürlichen Gesteinseigenschaften eines Salzvorkommens entspricht; dieses besteht zu $> 90\%$ aus Halit, aber auch aus Anhydrit, Tonen usw. in einem heterogenen Kornverband. Der Lösungsgehalt in natürlich vorkommenden Steinsalz liegt laut DAEF (2016) bei 0,1 bis 1 %

⁶ Konvergenz bezeichnet allgemein das Schließen von Hohlräumen im Gebirge aufgrund des Gebirgsdrucks.

⁷ Messungen von senkrecht zur Bohrlochachse stehenden Verformungen, durch gegeneinander beweglicher Verrohrungsabschnitte einer Bohrung. Der Ringraum zwischen Verrohrung und Bohrlochwand ist dabei mit Mörtel fixiert, um eine direkte Übertragung der Verformung auf die Verrohrung und deren beweglichen Abschnitte zu gewährleisten.

⁸ Bestimmung von Riss- und/oder Kluftöffnungsweiten

und somit sehr viel niedriger als die im Labor hergestellten Proben von GHANBARZADEH ET AL. (2015); auch die Verzahnung der Poren sind unter natürlichen Bedingungen ausgeprägter, was einer durchgehende Wegsamkeit entgegensteht. Die Proben von GHANBARZADEH ET AL. (2015) wurden in Autoklaven auf Temperaturen von 100 bis 275 °C und Drücken von 200 bis 1000 bar über einen Zeitraum von fünf Tagen hergestellt; im Anschluss werden sie aus den Autoklaven genommen und auf Raumtemperatur abgekühlt. Dies entspricht nicht den natürlichen Bildungsbedingungen von Salzgestein. In DAEF (2016) wird das „Quenchen“, also die schlagartige Abkühlung auf Raumtemperatur, als problematisch für die Messergebnisse angesehen, da dies zu einer sofortigen Öffnung von Porenraum führt. Die synthetischen Proben und Messergebnisse von GHANBARZADEH ET AL. (2015) sind nicht repräsentativ für natürliche Bedingungen, bei denen Salzgestein über viele Millionen Jahre kompaktiert werden. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse wird daher auch von der DAEF (2016) als zweifelhaft eingeschätzt.

Um die hydrogeologische Situation in natürlichen Salzvorkommen abschätzen zu können, müssen laut BRÄUER ET AL. (2012) lokale Auflockerungszonen im Salz, abgeschlossene Fluidvorkommen sowie auch Bereiche mit Anhydrit bekannt sein. Dazu wurden nach BRÄUER ET AL. (2012) Permeabilitätsmessungen zur Abschätzung der Durchlässigkeit durchgeführt. Es wird ein Testfluid mit bekannten Kennwerten zu Kompressibilität und Zähigkeit innerhalb einer Bohrung in den Porenraum des Salinars verpresst und der Fluiddruck im Bohrloch dabei kontinuierlich gemessen. Die Durchlässigkeit (Permeabilität) des Gesteins kann aus dem zeitlichen Druckverlauf bestimmt werden (BRÄUER ET AL. 2012). Auch MINKLEY & BRÜCKNER (2016) haben die Dichtheit von Salzgesteinen mittels Gasinjektion bis 190 bar durchgeführt (Druck und Temperatur der Messanordnung: 90 MPa, ca. 95 °C); dabei konnte die Gasdichtheit von Salz festgestellt werden. Bei Erkundungsbohrungen im Salzstock Gorleben konnten darüber hinaus einige lokale Fluideinschlüsse angebohrt und deren Druck- und Zuflussmengen gemessen werden; über eine Materialbilanzrechnung konnten damit eine untere und eine obere Grenze für das Volumen von lokalen Fluidvorkommen (Gas und Flüssigkeiten) im Salzstock berechnet werden (BRÄUER ET AL. 2012).

BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) beschreiben, dass mikroakustische Messverfahren eingesetzt werden können, um die hydraulische Integrität im Salz nachweisen zu können. So können Mikrorisse mit Hilfe von hochauflösenden seismischen Messungen abgebildet und Auflockerungszonen detektiert werden. „Fluid inclusions“ und lokal vorkommende Lösungszutritte können laut BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) mit hydrochemischen und isotopengeochemischen Methoden genau untersucht und damit deren Herkunft nachgewiesen werden. Dazu soll erwähnt werden, dass durch Salzbildungs- und aufstieg intrasalinare Lösungen existieren können, welche allerdings in vereinzelt und isolierten Systemen vorkommen. Die geringen Lösungsvorkommen und deren Herkunftsbestimmung sind laut BOLLINGERFEHR ET AL. (2011)

wichtig für den Nachweis der Langzeitsicherheit und des Einschlussvermögens des Wirtgesteins. Zur Möglichkeit der Detektion von Lösungsbereichen wurde im Jahr 2011 eine Machbarkeitsprüfung von geoelektrischen Messmethoden im Bergwerk Asse durchgeführt (MEIER 2011). Die Eindringtiefe ist laut MEIER (2011) dabei wegen des hohen Widerstands von trockenem Salzgestein und der schwierigen Ankopplungsbedingungen auf bis 1 m stark eingeschränkt. Trotzdem konnte durch MEIER (2011) festgestellt werden, dass Laugenbereiche grundsätzlich durch den Unterschied in der elektrischen Leitfähigkeit im Vergleich zu trockenem Salzgestein detektiert werden können. Allerdings ist hier die Unterscheidung zwischen tatsächlich laugenführenden Zonen und anthropogen durchfeuchteten Bereichen (z.B. durch Bewetterung) schwierig. Ein von MEIER (2011) vorgeschlagenes Konzept schlägt eine Trennung von Stromeinspeisung und Potentialmessung vor. So kann an Stellen, an denen Lauge austritt, Strom angelegt und an einer weiteren Austrittsstelle überprüft werden, ob ein elektrisches Potential aufgebaut wurde und damit eine Verbindung zwischen beiden Austrittsstellen besteht.

- Salinare Lösungen

Salzlösungen sind natürlicher Bestandteil von allen Salzvorkommen, bedingt durch den Einschluss von Lösung während der Eindunstung des Zechsteinmeeres. Die Flüssigkeitsgehalte variieren laut HERRMANN & KNIPPING (1993) zwischen 0,1 Vol.-% und etwa 2,0 Vol.-% H₂O und befinden sich auf Korngrenzen oder existieren als abgeschlossenes Vorkommen (fluid inclusions). HERRMANN & KNIPPING (1993) erklären weiter, dass Lösungsvorkommen mit bis zu 1000 m³ Volumen nachgewiesen werden konnten. Es handelt sich dabei um isolierte, lokale Vorkommen, welche immobil bleiben, wenn der Spannungszustand, beispielsweise durch das Auffahren eines Bergwerkes, nicht verändert wird. Die Lösungsvorkommen sind NaCl-gesättigt und stehen mit dem umgebenden Steinsalz im Gleichgewicht. Neben den natürlichen Lösungen können auch Flüssigkeiten durch Bergbautätigkeiten, z.B. durch die Bewetterung, durch Bohrspülungen etc., eingebracht werden. Nach BORNEMANN ET AL. (2008) sind die Lösungsvorkommen nicht beliebig verteilt, sondern an bestimmte Einheiten (v. a. Anhydrit, Tonlagen, Störungs- und Kluftzonen, Kaliflöze) gebunden. In Salzstocks Gorleben wurden Lösungsvorkommen von wenigen cm³ bis mehreren hundert m³ angetroffen.

- Kohlenwasserstoffe

BRACKE ET AL. (2012) haben das Vorkommen von Kohlenwasserstoffen am Standort Gorleben untersucht. Dabei wurden geochemische und geomechanische Aspekte untersucht und deren Bedeutung für die Endlagerauslegung beleuchtet. Dabei soll angemerkt werden, dass sich dieser Bericht und seine Ergebnisse auf den Standort Gorleben, d.h. auf das Wirtsgestein Salz und die Verteilung der Kohlenwasserstoffe in den dort aufgefahrenen Erkundungsstrecken bezieht. Als

Einlagerungsvariante wurde für den Salzstock Gorleben die Streckenlagerung mit Pollux-Behältern zu Grunde gelegt (BRACKE ET AL. 2012).

BORNEMANN ET AL. (2008) erklären, dass Kohlenwasserstoffvorkommen in Salinargesteinen in Salzstöcken im niedersächsischen Raum nicht ungewöhnlich sind. Alkane bilden den Hauptbestandteil der natürlich vorkommenden Kohlenwasserstoffe in Erdöl- und Erdgaslagerstätten. Alkane mit weniger als fünf Kohlenstoffatomen liegen unter Normalbedingungen im gasförmigen Zustand, mit mehr als 17 Kohlenstoffatomen im festen Aggregatzustand vor (BRACKE ET AL. 2012). Allerdings sind Mischungen aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen meist flüssig, auch wenn sich darunter langkettige Alkane befinden. Kohlenwasserstoffe sind ab Temperaturen von 200 °C brennbar (BRACKE ET AL. 2012).

Nach BRACKE ET AL. (2012) können Kohlenwasserstoffe durch Wegsamkeiten in das Salzgestein eindringen oder autochthon, d.h. im Salzgestein selbst, gebildet werden. Im zweiten Fall bedeutet dies, dass organisches Material zeitgleich mit der Bildung der Evaporite abgelagert und dort zu Kohlenwasserstoff umgesetzt wurde. Im Salz finden sich die Kohlenwasserstoffe häufig in Schichten mit Anhydrit oder Tonlagen, da dort die zur Gasspeicherung nötige Porosität vorhanden ist (BORNEMANN ET AL. 2008). Des Weiteren sind Kohlenwasserstoffe in Zerrüttungs- oder Störungsbereichen möglich (BRACKE ET AL. 2012). Nach BORNEMANN ET AL. (2008) ist ein Vorkommen ebenso im Kaliflöz Staßfurt beobachtet worden. Generell sind die Alkane intrakristallin, also innerhalb des Salzkristallgitters oder interkristallin an den Korngrenzen gespeichert. Laut BRACKE ET AL. (2012) ist der Fall des interkristallinen Vorkommens wesentlich häufiger und betrifft mehr als 90 Vol.-% der gesamten Kohlenwasserstoffvorkommen.

Die Kohlenwasserstoffe im Salzstock Gorleben zeigten sich zum Teil als dunkle Austrittsfahnen, da der Druck durch die Streckenauffahrung im angrenzenden Salzgestein stark erniedrigt wurde und die Kohlenwasserstoffe aus ihren Vorkommen am Stoß austreten können (BORNEMANN ET AL. 2008). Aromatische Kohlenwasserstoffe konnten dagegen auch mit fluoreszierendem Licht sichtbar gemacht werden (BRACKE ET AL. 2012). Die Kohlenwasserstoffgehalte werden nach BRACKE ET AL. (2012) auf 40-250 ml/m³ geschätzt, liegen meist aber unter 100 ml/m³.

Da Kohlenwasserstoffe nach BRACKE ET AL. (2012) natürlicherweise in den meisten sedimentären Gesteinen vorkommen, stellt sich die Frage, ob und inwiefern die Kohlenwasserstoffe ein zukünftiges Endlager beeinträchtigen könnten.

In Bezug auf die Standsicherheit und Integrität muss beachtet werden, dass durch die Kohlenwasserstoffe, bzw. durch die thermomechanische Sulfatreduktion (TSR) laut BRACKE ET AL. (2012), eine Veränderung der Porosität und der Permeabilität möglich ist. Die Reaktion kann darüber hinaus zu Änderungen des Porendrucks und der herrschenden Spannungen führen. Die TSR kann allerdings auch bei Anwesenheit von Wasser oder Wasserstoff stattfinden,

Kohlenwasserstoffe sind dafür nicht zwingend erforderlich (BRACKE ET AL. 2012). Die Kohlenwasserstoffe können nach BRACKE ET AL. (2012) außerdem auch Auswirkungen auf die Kriechraten des Salzgesteins haben. Diese Auswirkungen sind allerdings nicht genau geklärt. So ist es möglich, dass die Kohlenwasserstoffe als eine Art Schmiermittel fungieren oder im Gegenteil die Bewegungsraten auf den Kornoberflächen stark verringern (BRACKE ET AL. 2012).

Auch die thermische Ausdehnung nach Einbringen der Abfälle muss in Bezug auf die Integrität beachtet werden. Theoretisch könnten so große Spannungen auftreten, dass die Zugfestigkeit des umgebenden Salzgesteins überschritten wird und Wegsamkeiten entstehen. In Modellrechnung konnte für das Beispiel des Salzstocks Gorleben laut BRACKE ET AL. (2012) aber gezeigt werden, dass keine Integritätsverletzungen durch die thermisch induzierte Volumenvergrößerung entstehen werden. Auch eine Art „Fracking“ durch erhöhte Fluiddrücke wird ausgeschlossen, da hierfür die Volumina der Kohlenwasserstoffe zu gering sind. Die Folge wäre wahrscheinlich eine lokale Ausbreitung der Fluide, aber keine Ausbildung größerer Risse (BRACKE ET AL. 2012).

In Bezug auf die Betriebssicherheit bei der Auffahrung muss festgestellt werden, dass konturnah bei Auffahrung eine Auflockerungszone (EDZ) im Salzgestein entsteht, so dass dort vorhandene Kohlenwasserstoffe austreten können. Da die Kohlenwasserstoffvorkommen in ihrem Volumen begrenzt und nicht miteinander verbunden sind, läuft das Austreten zeitlich degressiv ab. Schlagartige Abschalungen oder größere Auswürfe sind laut BRACKE ET AL. 2012 dabei nicht zu erwarten, da die Volumina der Kohlenwasserstoffvorkommen dafür zu gering sind. Außerdem ist Steinsalz viermal zugfester als Kalisalze, bei denen in anderen Bergwerken durchaus solche Gasauswürfe beobachtet worden sind (BRACKE ET AL. 2012).

- Andere Gasvorkommen

Neben Kohlenwasserstoffen sind es vor allem Reservoirs an CO₂, die eine Gefahr im Salzbergbau darstellen. CO₂ ist zwar im Gegensatz zu Kohlenwasserstoffen an keinen chemischen Reaktionen beteiligt und hat keinen Einfluss auf die Behälterkorrosion, trotzdem muss vor allem während der Auffahrung des Bergwerks im Hinblick auf die Betriebssicherheit auf CO₂ geachtet werden.

Als ein Beispiel für die Gefahren und Auswirkungen von CO₂ kann die Kaligrube Merkers genannt werden. Eine Besonderheit dieses Bergwerks stellen die Basaltgänge dar, die das Salz durchschlagen und dabei auch große Mengen an Gasen in den Salzstock gebracht haben. MINKLEY & POPP (2010) erklären, dass sich das CO₂ vor allem in den Gesteinen des Oberrotliegend und des basalen Zechsteins angesammelt hat. Das heißt, dass in der Grube Merkers mehrere Gas-Reservoirs in 800 bis 1000 m Teufe existieren, in denen CO₂ gasförmig, flüssig oder überkritisch vorliegen kann. Als Folge einer Sprengung an einem vermutlich

vorgeschädigten Carnallitit-Pfeiler ereignete sich im Jahr 1989 der Gebirgsschlag Völkershausen mit der Magnitude 5,6 (MINKLEY & POPP 2010). Innerhalb kürzester Zeit sind um den Gebirgsschlag 3200 weitere Carnallitit-Pfeiler in einer Fläche von 6,5 km² gebrochen. Als Folge des Gebirgsschlags sind von 1989 bis Ende 2000 46 Mio. m³ CO₂ aus Rissen im südöstlichen Bereich des Bruchfeldes in die Grube eingedrungen oder wurden über Bohrungen gefördert (MINKLEY & POPP 2010).

Bei einem anderen Grubenunglück in Unterbreizbach 2013 kam es bei einer Routinesprengung zu einem sehr großen CO₂-Gasausbruch, in dessen Folge drei Arbeiter erstickt sind. Laut dem Betreiber K+S sind CO₂-Vorkommen im Salz durchaus bekannt, eine solch große Gasmenge in einem abgeschlossenen Reservoir ist allerdings ungewöhnlich (SPIEGEL ONLINE 2013).

CO₂-Reservoirs bilden somit vor allem während der Auffahrung des Bergwerks eine Gefahr, sowohl durch explosionsartige Ausbrüche als auch durch ein mögliches Ersticken bei größerer Ansammlung des Gases. Da sich seismische Wellen nicht durch Gase und Flüssigkeiten ausbreiten, wäre es theoretisch möglich solche Gasreservoirs mit Hilfe geophysikalischer Messungen zu lokalisieren.

Darüber hinaus kann nach BORNEMANN ET AL. (2008) aufgrund der Analysen der freien Gasvorkommen auf Stickstoffvorkommen rückgeschlossen werden. Grundsätzlich werden stickstoffhaltige und stickstofffreie Gase unterschieden. Erstere kommen oft zusammen mit Sauerstoff vor, letztere sind sauerstofffrei (BORNEMANN ET AL. 2008). Nach BORNEMANN ET AL. (2008) wird davon ausgegangen, dass die N₂-O₂-Gasgemische Einschlüsse der Paläoatmosphäre zum Bildungszeitpunkt des Salzstocks darstellen und werden als Abbauprodukt organischer Substanzen unter anoxischen Bedingungen angesehen.

Materialeigenschaften des Wirtsgesteins (Gesteinsprüfkörper)

Die Kenntnis der Materialeigenschaften und der mechanischen Charakteristika ist entscheidend für die Erstellung von numerischen Modellen und Integritätsberechnungen. Diese Messungen finden im Labor an so genannten Gesteinsprüfkörpern statt. Laut BRÄUER ET AL. (2012) werden die Verformungseigenschaften und die Festigkeit mit Hilfe von ein- und triaxialen Druckversuchen und Spaltzugversuchen bestimmt. Im Vorfeld werden Ultraschallmessungen durchgeführt, welche Anisotropien im Prüfkörper, z.B. Schichtung, oder Auflockerungsbereiche aufzeigen können (BRÄUER ET AL. 2012). Bei den Spaltzugversuchen werden senkrecht zu einer auf den Prüfkörper angelegten Belastung Zugspannungen erzeugt, welche bis zum Bruch des Prüfkörpers gesteigert werden. So kann die Zugfestigkeit des Gesteins bestimmt werden (BRÄUER ET AL. 2012). Mittels einaxialen oder triaxialen Festigkeitsversuchen wird die axiale

Belastung bis hin zum Brechen des Prüfkörpers gesteigert. Ein Fortsetzen des Versuches über den Bruchzustand hinaus wird zur Ermittlung der Nachbruchfestigkeit durchgeführt (BRÄUER ET AL. 2012). Von besonderer Bedeutung in Hinblick auf die Integrität des Wirtsgesteins ist darüber hinaus die Bestimmung des Kriechverhaltens des Salinars. Dazu wurden laut BRÄUER ET AL. (2012) im Rahmen der Standorterkundung des Salzstocks Gorleben ebenfalls an ein- oder triaxialen Prüfständen Versuche durchgeführt. Die Messung kann bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeitsgehalten durchgeführt werden, um möglichst realitätsnahe Kennwerte für ein mögliches Endlager mit wärmeentwickelnden Abfällen zu erhalten.

Aus den oben beschriebenen Messungen und erhaltenen Materialkennwerten wurden nach BRÄUER ET AL. (2012) zeitabhängige sowie zeitunabhängige Modelle zum Materialverhalten erstellt. Der Fokus lag dabei auf Kriechverhalten und Formänderungen aufgrund von plastischen Fließ- bzw. Bruchzuständen. Darüber hinaus konnten Temperaturfeldberechnungen, Spannungsverläufe, Gebirgsverformungen, thermisch induzierte Rissbildungen etc. abgebildet werden (BRÄUER ET AL. 2012). Elektromagnetische (Impuls-)Reflexionsmessungen (EMR) werden laut BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) dazu verwendet, um die Internstrukturen des Salinars im Detail zu erfassen. So können Reflektoren, wie Anhydrit- oder Kalisalzschichten abgebildet und nachgewiesen werden.

Endlagerrelevante gekoppelte Vorgänge

Es ist laut BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) entscheidend zu verstehen, welche gekoppelten endlagerrelevanten Prozesse unter natürlichen Gegebenheiten ablaufen werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden verschiedene Gegebenheiten (z.B. Temperatur, Durchlässigkeit, Spannungssituation) und gekoppelte endlagerrelevante THMC-Vorgänge im Hinblick auf die Integrität des Wirtsgesteins und möglicher Barrieren untersucht. Nach BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) wurden dazu beispielsweise in der Schachtanlage Asse II die Auswirkungen von ionisierender Strahlung auf Steinsalz und auf geotechnische Barrieren untersucht. Als weiteres Beispiel nennen BOLLINGERFEHR ET AL. (2011) die Analyse der Verformung von Behältern sowie Hohlräumen durch eine Änderung des Spannungszustandes im Gebirge und durch Kriechen von Salz. Durch einen multidisziplinären Ansatz und die Erstellung von unterstützenden Modellen, können die komplexen ablaufenden Prozesse und deren Zusammenhang besser verstanden werden. Im THERESA-Projekt (WIECZOREK ET AL. 2010) wurde die Anwendbarkeit mathematischer Modelle und Computer-Codes für geologische Endlagerbergwerke (v.a. bei Konzeptentwicklung und -planung, Sicherheitskonzept sowie Monitoring in der Nachverschlussphase) geprüft; die Basis der Modelle stellten hier ebenfalls THMC-Prozesse in geologischen Systemen dar. BRACKE ET AL. (2014) untersuchten THMC-Prozesse eines Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle: darin wurden sowohl relevante Vorgänge

für die Langzeitsicherheit und bestehende Ungewissheiten identifiziert, als auch Simulationsmethoden getestet sowie die Verwendung der Ergebnisse für die Erstellung eines Langzeitsicherheitsnachweis für Salz und Ton als Wirtsgesteine analysiert.

Klüfte und Störungen als potenzielle Wegsamkeiten

Von besonderem Interesse für die Sicherheitsbewertung eines Standortes ist dessen Fähigkeit zum sicheren Einschluss. Somit sollten Wegsamkeiten, welche zu einer Verbreitung von Fluiden und dementsprechend auch von Radionukliden führen können, so genau wie möglich bekannt sein. Nach BORNEMANN ET AL. (2008) sind natürlich entstandene Störungen oder Klüfte zumeist bereits durch Neukristallisation von Salinargestein wieder verschlossen. Demgegenüber stehen Kluftsysteme, welche lösungsführend sind und im Rahmen der Gorleben erkundung auch angetroffen oder indirekt nachgewiesen werden konnten. Allerdings erklären BORNEMANN ET AL. (2008) dazu, dass der Zufluss von Lösungen gering und zeitlich begrenzt war, womit von einem räumlich begrenzten Kluftsystem ausgegangen werden kann. Angesichts des Volumens der austretenden Gase, wird auch hier laut BORNEMANN ET AL. (2008) ein begrenztes Kluftsystem unterstellt. Die Zuflüsse betrugen bis zu 100 m³ (BORNEMANN ET AL. 2008).

Als Ursachen für Kluftbildungen im Salzgestein nennen BORNEMANN ET AL. (2008) Klimaänderungen für den Bereich des Salzspiegels und tektonische Vorgänge sowie Metamorphoseprozesse. Im Salzspiegel des Salzstocks Gorleben werden die flach einfallenden Klüfte als Entlastungserscheinungen nach Rückzug eines Gletschers angesehen (BORNEMANN ET AL. 2008). Die oberflächennahe, so genannte Ablaugung von Kalisalzen kann im Bereich der Salz-Metamorphose durch den Verlust der Magnesium- und Kaliumminerale zu Volumenverringerungen und somit zu Brüchen führen. Darüber hinaus erklären BORNEMANN ET AL. (2008), dass durch die unterschiedlichen Verformungseigenschaften der Salinargesteine mechanische Prozesse innerhalb des Salzstocks unterschiedliche Auswirkungen haben können. Dies kann gegebenenfalls zur Ausbildung von Rupturen führen. Diese Prozesse können beispielsweise tektonisch durch eine Veränderung des Spannungsfeldes ausgelöst sein.

5.3 Zur umfassenden vorläufige Sicherheitsuntersuchung im dritten Verfahrensschritt

Die positive Bewertung der Integrität ist eine wesentliche Voraussetzung, um einen ewG ausweisen zu können. Die Basis einer solchen Analyse bilden unter anderem die Ergebnisse der geologischen Langzeitprognose, das erwartete Abfallinventar und das Endlagerkonzept. Die Integritätsanalyse soll zeigen, ob die Integrität des ewG über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre erhalten bleibt oder verletzt wird. Mit den Erkundungsergebnissen der über- und untertägigen Erkundung stehen nun alle relevanten Daten zur Verfügung, um verschiedene Szenarien des ewG zu entwickeln und eine umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchung durchführen zu können. Das Ergebnis stellt im Grunde einen kompletten Safety Case dar, es sei denn die untertägige Erkundung wurde nicht komplett durchgeführt, wie es beim Salzstock Gorleben der Fall war.

1. Erstellung eines Sicherheits- und Nachweiskonzepts

Laut BMU (2010) ist die Langzeitaussage zur Integrität des ewG für die wahrscheinlichen Entwicklungen des Systems zu treffen. In der VSG wurden zusätzlich Integritätsanalysen für weniger wahrscheinliche Ereignisse durchgeführt (KOCK ET AL. 2012). Auf Grundlage der „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ (BMU 2010) wird die Integrität anhand zweier Kriterien überprüft:

- I. Dilatanzkriterium: es dürfen keine Gefügebrauchlockerungen mit Risswachstum und Vernetzung der intrakristallinen Risse durch deviatorische Spannungen entstehen.
- II. Fluidruckkriterium bzw. Minimalspannungskriterium: in der ausgewählten Tiefenlage und im ewG müssen die kleinste Gebirgsdruckspannung und die zu überwindende Zugfestigkeit zusammen größer sein, als der hypothetisch mögliche Fluidruck. So ist ein druckgetriebenes Eindringen von anstehenden Fluiden verhindert.

Das genaue Vorgehen zur Beurteilung dieser Kriterien ist nicht detailliert ausgeführt. Im Rahmen der VSG wurden die Kriterien unabhängig voneinander geprüft und eine Verletzung der Integrität des ewG bei Verletzung nur eines der Kriterien unterstellt (KOCK ET AL. 2012, MÖNIG ET AL. 2012). Nach BMU (2010) muss außerdem gezeigt werden, dass die Temperaturerhöhung durch Einbringen der wärmeentwickelnden Abfälle keine Schädigung des ewG hervorrufen kann. Entscheidend hierfür ist die Kenntnis des natürlichen Temperaturfeldes im Endlagerniveau, was bereits im zweiten Verfahrensschritt abgeschätzt und schließlich durch Messungen im dritten Verfahrensschritt bestätigt werden kann.

Wie in den Sicherheitsanforderungen des BMU (2010) darüber hinaus erklärt, soll als die Grundlage für die rechnerische Analyse des Langzeitverhaltens des Endlagersystems ein möglichst realitätsnahes Modell dienen.

Nach MÖNIG ET AL. (2011) wurden in der VSG Sicherheitsprinzipien ausgewiesen, um die Schutzziele nach BMU (2010) zu erfüllen. Für das Sicherheits- und Nachweiskonzept wurden der Einschluss in einem ewG, die möglichst geringe Erhöhung des Risikos für Mensch und Umwelt durch Freisetzungseignisse (im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition) sowie die Wartungsfreiheit des ewG als grundlegende Prinzipien festgelegt. Für die Erstellung eines Sicherheitskonzepts bedeutet das laut MÖNIG ET AL. (2011) der Nachweis von Sicherheit sowohl während des Betriebs als auch während der Nachverschlussphase. Um hier für den Nachweis erbringen zu können, wurden Indikatoren und Kriterien festgelegt. Darüber hinaus wurden methodische Konzepte entwickelt (MÖNIG ET AL. 2011); hierzu zählen Einschätzungen bezüglich betrieblicher Sicherheit, Integrität von geologischer sowie geotechnischer Barrieren, radiologischer Konsequenzbetrachtungen, Kritikalitätsanalyse und die Bewertung von unabsichtlichem menschlichem Eindringen. Es wurden unter anderem die allgemeine Standortbeschreibung, geologische Profile, das Konzept des Grubengebäudes mit Sicherheitsabständen, thermische und mechanische Kennwerte und berechnete Kriecheigenschaften zu Grunde gelegt.

2. Erstellung eines Endlagerkonzepts

Die endgültige Entscheidung für das anzuwendende Endlagerkonzept, soweit noch nicht für die jeweiligen Standorte oder generell für alle im Verfahren verbliebenen Standorte entschieden, könnte aus rein geologischen Aspekten spätestens nach den Erkenntnissen der untertägigen Erkundung gewählt werden. Allerdings ist anzunehmen, dass die Entscheidung für ein Konzept spätestens nach der übertägigen Erkundung und zur genauen Festlegung eines Vorgehens für die untertägige Erkundung bereits erfolgt ist.

3. Geowissenschaftliche und klimatische Langzeitprognose

Wie bereits für die weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchung nach der übertägigen Erkundung beschrieben, behält die geowissenschaftliche und klimatische Langzeitprognose während des gesamten Verfahrens ihre Gültigkeit. Sie wird lediglich durch die gewonnenen Erkenntnisse während der Erkundung ergänzt und überprüft.

4. Wahrscheinlichkeit möglicher Freisetzungseignisse

In der untertägigen Erkundung kann ein umfassender Einblick in den Aufbau des Salinars gewonnen werden. So werden inhomogene Bereiche, bzw. das Vorkommen von Anhydrit- oder Tonlagen sowie Carnallit, welche sich nicht für die Errichtung des ewG eignen, kartiert. Darüber hinaus können durch die untertägige Kartierung sowie durch EMR-Messungen Fluidvorkommen oder fluidgefüllte Klüfte erkannt werden. Betrachtungen zur Geomechanik und zu wirtsgesteinsspezifischen Eigenschaften werden in-situ und an Gesteinsprüfkörpern im Labor durchgeführt. Der „Quellterm Endlagerbergwerk“, welcher bisher durch angepasste Eingangsparameter aus der VSG oder aus vergleichbaren Berechnungen zu Grunde gelegt wurde, kann nun konkret für den erkundeten Standort definiert werden. Es sollten somit ausreichende Informationen vorliegen, um Berechnungen zu möglichen Freisetzungseignissen, Freisetzungspfaden, Fließgeschwindigkeiten etc. durchführen zu können. Die nach dem zweiten Verfahrensschritt entwickelten Szenarien können nun weiterentwickelt und/oder vervollständigt werden. Die Szenarien werden je nach Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens in Gruppen eingeteilt (BEUTH 2013); die repräsentativen Szenarien dienen hierbei als Grundlage für die Erstellung eines Langzeitsicherheitsnachweises.

5. Ungewissheiten und Sicherheitsreserven und

6. Erkundungs- und FuE-Bedarf, Optimierungsmöglichkeiten

Beide Punkte werden im Folgenden zusammengefasst, da sie eng miteinander verknüpft und aufeinander bezogen sind. Eine Übersicht in Bezug auf die sicherheitsrelevanten Sachverhalte bietet Tab. 13. Trotz einer umfassenden über- und untertägigen Erkundung sind Einschränkungen bezüglich einer gesicherten Einschätzung der Integrität und Langzeitsicherheit vorhanden. Es ist zum Beispiel möglich, dass Prozesse noch nicht genau verstanden werden. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass trotz untertägiger Erkundung, Auffahrung eines Erkundungsbereichs und gegebenenfalls eines Untertagelabors (URL) gewisse Ungewissheiten bleiben werden, so werden beispielsweise kleinräumigere Inhomogenitäten oder Fluid- sowie Gasvorkommen wohl erst bei Auffahrung des eigentlichen Endlagerbergwerks erkannt werden. Das Wissen um solche Ungewissheiten, welche nicht im Vorfeld beseitigt werden können, muss bei der Auffahrung vorhanden sein.

Um einen Langzeitsicherheitsnachweis erbringen zu können, werden geomechanische Berechnungsmodelle erstellt, welche das komplexe Verhalten des Salinars einschließlich des mechanischen Verhaltens von inhomogenen Bereichen verdeutlichen können. KOCK ET AL. 2012 schlagen außerdem vor, dass die thermomechanischen Prozesse mit Hilfe numerischer Rechenverfahren abgebildet werden. So kann die Möglichkeit der Entstehung von mechanischen

Schädigungen oder fluiddruckgetriebenen Öffnungen simuliert werden. Die Modellierung umfasst die thermomechanische Beanspruchung der Salinarbarrieren, also die Auswirkungen durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle, die Auswirkungen dynamischer Beanspruchung als Folge von Erdbeben, ebenso wie klimatische Belastungen (z.B. Eiszeiten, Kaltzeiten) und gekoppelte Prozesse.

Tab. 12: Übersicht über die im dritten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte, daraus folgender Kriterien und Sicherheitsbewertungen

Gegebenheit am Standort	Sicherheitsbewertung (ebenfalls in Hinblick auf mögliche Kombinationen mit anderen Gegebenheiten) Ausschlusskriterien/ Abwägungskriterien	Bedeutung der gewonnen Inputdaten für die Sicherheitsuntersuchung
Temperatur im Einlagerungsniveau	<p>Eine erhöhte Temperatur hat eine erhöhte Kriechrate des Salinars zur Folge. Darüber hinaus können thermisch induzierte Reaktionen ablaufen und die Einhaltung von Grenztemperaturen gefährdet werden.</p> <p>→ Abwägung: Eine erhöhte Temperatur ist grundsätzlich positiv zu bewerten, wenn alle vorgegebenen Grenztemperaturen eingehalten werden können.</p> <p>→ Überprüfung für jeden Standort nötig: Die Gegebenheiten am Standort können u. U. durch die Überschreitung von Grenztemperaturen zum Ausschluss führen, sofern Anpassungen des Endlagerkonzepts nicht in hinreichendem Maße möglich sind.</p>	<p>Durch langfristige Messungen untertage lässt sich die Temperatur im Einlagerungsniveau sehr genau bestimmen. So kann die Einhaltung der vorgeschriebenen Grenztemperaturen und die Möglichkeit von thermisch induzierten Reaktionen überprüft und vorhergesagt werden.</p> <p>Entsprechende Berechnungen sind als Bestandteil der Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen.</p>

<p>Wegsamkeiten im Salinar</p>	<p>Klüfte und Störungen stellen Wegsamkeiten für Gase und Fluide dar. Für das Wirtsgestein Steinsalz wird davon ausgegangen, dass vorhandene Klüfte (ohne Gas- oder Flüssigkeitseinschluss) im Laufe der Zeit durch Neukristallisation verschlossen werden und generell räumlich begrenzt sind. Eine Besonderheit stellen die Kryogenen Klüfte dar, da deren genaue Bildungsbedingungen nicht bekannt sind.</p> <p>→ Mögliche Wegsamkeiten sind so gut wie möglich zu kartieren und deren Gefährdung für die Barrierenwirksamkeit des ewG einzuschätzen.</p> <p>→ Abwägung: Ein Standort ohne tiefreichende oder vernetzte Kluftsysteme ist zu bevorzugen.</p>	<p>Durch Kartierung der aufgefahrenen Bereiche und durch Analyse von Bohrkernen bzw. Bohrlöchern können Klüfte und Störungen detektiert und die Richtung des Einfallens bestimmt werden. Es ist allerdings keine Aussage darüber möglich, wie weit die Klüfte weiter ins Salinar reichen.</p> <p>Durch EMR-Messungen können lösungs- oder gasgefüllte Klüfte und Störungen abgebildet werden. Die Auflösung und Reichweite dieser Messung ist allerdings abhängig von der gewählten Messfrequenz.</p>
<p>Inhomogene Bereiche</p>	<p>Vorhandene Anhydrit- oder Tonlagen stellen Wegsamkeiten dar und können Gase oder Fluide enthalten. Carnallitit stellt vor allem durch eine mögliche Instabilität (Gebirgsschlag) eine Gefährdung dar und kann bei Einbringung von wärmeentwickelnden Abfallstoffen seine Kristallstruktur verändern und Kristallwasser freisetzen.</p> <p>→ Ausschluss von Standorten, bei denen die Realisierung eines Bergwerks (inkl. Sicherheitsabstände) im homogenen Steinsalzkern nicht möglich ist.</p> <p>→ Ausschluss von Bereichen innerhalb eines Salzstocks Anhydrit-, Ton- oder Carnallitit-Lagen.</p>	<p>Die Auffahrung eines Forschungsbergwerkes sowie seismische Messungen und/oder Bohrungen gewährleisten einen umfassenden Einblick in die geologische Situation untertage. So kann nach der untertägigen Erkundung die Position des Endlagerbergwerks innerhalb des Salzstocks geplant werden. Allerdings muss mit lokalen und kleinräumigen Inhomogenitäten gerechnet werden, welche durch die angewandten Messmethoden nicht erfasst werden konnten.</p>

<p>Gase und Lösungsvorkommen</p>	<p>Natürlicherweise können salzgesättigte Lösungen, Kohlenwasserstoffe und weitere Gase, wie H₂ und CO₂, im Salzgestein vorkommen. Vor allem CO₂ kann bei der Auffahrung und während des Betriebes eine erhebliche Gefahr darstellen. Ob das Vorkommen von Kohlenwasserstoffen eine Gefährdung für ein Endlagerbergwerk darstellen wird, ist noch nicht genau geklärt und muss weiter untersucht werden.</p> <p>→ Mögliche Gefährdung durch Fluide muss während der gesamten Planungsphase beachtet werden.</p> <p>→ Abwägung: Bereiche mit geringem oder fehlendem Fluidvolumen sind bei der Auswahl der Lokation des ewG zu bevorzugen.</p>	<p>Für eine umfassende und sichere Detektion von Kohlenwasserstoffen und anderen Fluidvorkommen, auch in entfernteren Salzstockbereichen, ist weitergehende Forschung nötig.</p> <p>Allerdings ist es durch die untertägige Erkundung (Kartierung der aufgefahrenen Bereiche, Seismik, Auswertung von Bohrungen) und durch die dort gemachten Beobachtungen möglich, eine Abschätzung über die Menge und Art der vorhandenen Fluide zu treffen.</p>
<p>Geomechanische Situation im Salinar, Materialeigenschaften</p>	<p>Die Integrität des ewG ist maßgeblich abhängig von der geomechanischen Situation, sowie auch vom Materialverhalten des Salinars.</p> <p>→ Untersuchungen des Spannungszustandes (Kurz- und Langzeit) und des Verformungsverhaltens.</p> <p>→ Abwägung: Die Entscheidung zwischen mehreren Standorten oder mehreren möglichen Positionen des ewG innerhalb eines Salzstocks muss zugunsten der Bereiche mit höherer Standsicherheit und Integrität getroffen werden.</p> <p>→ Ausschluss von Standorten oder Bereichen innerhalb eines Salzstocks, wenn eine ausreichende Standsicherheit oder Integrität nicht nachgewiesen werden kann.</p>	<p>Zur Beschreibung der geomechanischen Situation untertage und des Materialverhaltens des Wirtsgesteins werden sowohl in-situ-Versuche als auch Versuche an Gesteinsprüfkörpern im Labormaßstab während der untertägigen Erkundung durchgeführt. So können beispielsweise Einblicke in das Kriech- und Bruchverhalten, das Verhalten bei Zug- und Druckspannungen und der genauen Internstruktur des Salzes gewonnen werden.</p>

Tab. 13: Übersicht über die im dritten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte, die diesbezüglich bestehenden Ungewissheiten, Sicherheitsreserven, den Erkundungs- und FuE-Bedarf sowie mögliche Optimierungsmöglichkeiten

Gegebenheit am Standort	Ungewissheiten	Erkundungs- und FuE-Bedarf	Optimierungsmöglichkeiten und Sicherheitsreserven
Temperatur im Einlagerungsniveau	Im Erkundungsbergwerk können langfristige und lokal sehr genaue Temperaturmessungen durchgeführt werden.	Durch Ruheprofilmessungen kann die Temperatur im zweiten Verfahrensschritt lokal bestimmt werden. Eine genaue und langfristige Messung (da auch im Einlagerungsniveau und evtl. zukünftigen Einlagerungsbereich) stellen die untertägigen Messungen dar.	Die Temperatur im Einlagerungsniveau kann bereits vor der übertägigen Erkundung abgeschätzt werden (siehe Kapitel 4.3). Bei Kenntnis der Temperatur im Einlagerungsniveau kann das Endlagerkonzept (z.B. Abstand der Strecken zueinander, Sicherheitsabstände zu Carnallit-Vorkommen) angepasst werden.
Wegsamkeiten im Salinar	Im Erkundungsbergwerk können vorhandene Störungen und Klüfte kartiert werden. Durch seismische Messmethoden können Verlauf, Richtung und evtl. Reichweite nachverfolgt werden. Zusätzlich können Bohrungen die Auswertung unterstützen.	Es ist Forschungsarbeit bei der Detektion von fluidgefüllten Klüften zu leisten, da diese auch im Bereich des Arbeitsschutzes von enormer Bedeutung sind. Auch umkristallisierte Bereiche, welche mögliche Schwächezonen darstellen, können lediglich in Bohrungen oder aufgefahrenen Bereiche, nicht jedoch über angewandte Messmethoden erfasst werden.	Das Endlagerbergwerk kann an das Vorhandensein von Wegsamkeiten angepasst werden, z.B. durch Sicherheitsabstände um diese. Voraussetzung hierfür ist je nach Ausdehnung der inhomogenen Bereiche ein ausreichender Steinsalz Kern.
Inhomogene Bereiche	Durch Auffahrung eines Erkundungsbergwerks, Bohrungen und seismische Messungen können großräumige Inhomogenitäten lokalisiert und Sicherheitsabstände geplant werden. Es können trotzdem lokal Inhomogenitäten bei Auffahrung des eigentlichen	Je mehr Bohrungen im Erkundungsbergwerk zur Kartierung des umgebenden Gesteins abgeteuft werden, desto detaillierter können Aussagen zu inhomogenen Bereichen gemacht werden. Allerdings stellen diese Schwächezonen und mögliche	Das Endlagerbergwerk kann an das Vorhandensein von Inhomogenitäten angepasst werden, z.B. durch Sicherheitsabstände. Voraussetzung hierfür ist je nach Ausdehnung der inhomogenen

	Einlagerungsbergwerkes auftreten, welche nicht durch Bohrungen oder Messungen erfasst werden konnten.	Wegsamkeiten dar und müssen verfüllt werden. Es muss eine Abwägung zwischen Erkundungsbedarf und daraus resultierender Schädigung des Gesteins getroffen werden. Darüber hinaus sollten Messmethoden zur Detektion von Inhomogenitäten auch in weiter entfernten Bereichen verbessert und weiterentwickelt werden.	Bereiche ein ausreichender Steinsalz kern.
Gase und Lösungsvorkommen	Im Erkundungsbergwerk und in Bohrungen können Gase und Lösungsvorkommen detektiert und Gesamtmenge im Bergwerk in etwa abgeschätzt werden. Lokale Vorkommen, v.a. von Gasen stellen eine erhebliche Gefahr dar und werden auch durch hochauflösende Messungen in vielen Fällen v.a. in entfernteren Bereichen übersehen.	Es muss geklärt werden, bei welchen Gehalten KW für ein zukünftiges Endlager ein sicherheitstechnisches Problem darstellt bzw. ob das Vorhandensein von KW überhaupt als problematisch in Bezug auf die zu gewährleistende Sicherheit anzusehen ist. Für eine umfassende und sichere Detektion von Kohlenwasserstoffen und anderen Fluidvorkommen, auch in entfernteren Salzstockbereichen, ist weitergehende Forschung nötig.	Wenn fluidgefüllte Bereiche vermutet werden, deren Ausdehnung aber nicht genau erfasst werden kann, müssen Sicherheitsabstände eingerichtet werden. Das Endlagerkonzept kann gegebenenfalls dem Vorkommen von Fluiden (z.B. veränderte Materialeigenschaften bei Vorhandensein von KW), u.U. auch durch Errichtung von Sicherheitsreserven angepasst werden.
Geomechanische Situation im Salinar, Materialeigenschaften	Die Gegebenheiten können über in-situ-Versuche und im Labor getestet werden. Allerdings werden so v.a. lokale Einblicke gewonnen. Im Hinblick auf den Nachweiszeitraum können die durchgeführten Messungen allerdings nur kurzfristige	Die Durchführung der Versuche sollte über den größtmöglichen Zeitraum erfolgen, dies gilt ebenfalls für Laborversuche. Je mehr Probenkörper im Bergwerk an unterschiedlichen Stellen genommen werden, desto genauer können Aussagen für die	Eine Optimierung des Endlagerkonzepts kann im Rahmen der Ergebnisse der Messungen und der somit vorhandenen geomechanischen Situation durchgeführt werden. Können über Bereiche keine eindeutigen Aussagen getroffen werden (evtl.

	Veränderungen abbilden und sind bei der Übertragung in lange Zeiträume und langfristigen Veränderungen der umgebenden Bedingungen mit Unsicherheiten behaftet.	verschiedenen Bereiche im Bergwerk getroffen werden. Auch hier gilt: Es muss eine Abwägung zwischen Erkundungsbedarf und daraus resultierender Schädigung des Gesteins getroffen werden.	um Beschädigung des Wirtsgesteins zu vermeiden), können Sicherheitsbarrieren eingerichtet werden.
--	--	--	---

6 Standortauswahlgesetz – §§ 19, 20: Abschließender Standortvergleich und Standortentscheidung

Laut § 19 StandAG wird durch das BfE nach Abwägung aller privater und öffentlicher Belange und auf Basis der durchgeführten Sicherheitsuntersuchungen ein Standort für die Errichtung eines Endlagers für insbesondere wärmeentwickelnde radioaktive Abfallstoffe vorgeschlagen. Dabei muss sichergestellt sein, dass „[...] die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers gewährleistet ist und sonstige öffentlich-rechtliche Vorschriften nicht entgegenstehen“ (§ 19 Abs. 1 StandAG). Hinzu kommt eine umfassende Bewertung der Umweltauswirkungen, die sich durch das Endlager ergeben könnten.

Nach § 20 StandAG erfolgt danach die Überprüfung der sachgemäßen Durchführung des Standortauswahlverfahrens durch das BMUB. Im Anschluss wird dem Deutschen Bundestag der Vorschlag für einen Standort durch einen Gesetzesentwurf übermittelt. Zu den für den abschließenden Abwägungsprozess erforderlichen Unterlagen zählen nach § 20 Abs. 2 StandAG: „[...] ein zusammenfassender Bericht über die Ergebnisse des Standortauswahlverfahrens, die Beratungsergebnisse des gesellschaftlichen Begleitgremiums und die Ergebnisse der Öffentlichkeitsbeteiligung“. Die daraufhin getroffene Standortentscheidung ist für das im Anschluss durchgeführte Genehmigungsverfahren verbindlich.

6.1 Mögliche Vorgehensweise bei der Durchführung des abschließenden Standortvergleichs

Der abschließende Standortvergleich stellt, wie auch im StandAG formuliert, einen Abwägungsprozess dar. Die im Verfahren verbliebenen Standorte, die Ergebnisse aus den Erkundungen, die durchgeführten Sicherheitsuntersuchungen und die öffentlich-gesellschaftlichen Belange werden nochmal geprüft und verglichen.

Hierbei soll angemerkt werden, dass alle nach dem dritten Verfahrensschritt im Verfahren verbliebenen Standorte den zu Grunde gelegten Sicherheitsanforderungen genügen und somit alle einen sicheren Einschluss für den Nachweiszeitraum gewährleisten. Es stellt sich die Frage, wie ein abschließender Vergleich verschiedener Standorte in ihrer Gesamtheit, u. U. mit unterschiedlichen Einlagerungskonzepten oder unterschiedlichen Wirtsgesteinen, durchzuführen ist. Im Rahmen dieser Arbeit und auf Grundlage von hypothetischen Überlegungen und ohne konkrete Standort für den Vergleich, stößt eine solche Überlegung schnell an ihre Grenzen.

Eine mögliche Vergleichsmöglichkeit bietet die Biosphärenmodellierung, bzw. eine Abschätzung der zu erwartenden Dosis für die in der Nähe des Endlagers lebenden Menschen. Dabei können verschiedene Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems betrachtet werden und eine Art von Risikoabschätzung über den Dosisbegriff abgegeben werden. Das heißt, dass beispielsweise von einer Freisetzung einer gewissen Menge an Radionukliden nach einer bestimmten Zeit nach Verschluss des Endlagers ausgegangen wird. Mit Hilfe von Modellen können verschiedene Freisetzungspfade betrachtet werden, bis die Radionuklide schließlich in die Biosphäre gelangen. Dort gibt es verschiedene Möglichkeiten der Verbreitung sowie Anreicherung oder Verdünnung. Am Ende des Modells steht die Inkorporation von Radionukliden durch den Menschen. Durch eine Umrechnung in Dosis kann ein Vergleich zwischen verschiedenen Radionukliden und ihrer Wirksamkeit in verschiedenen Körperregionen bzw. Organen angestellt werden. Allerdings ist eine solche Modellierung extrem komplex und umfasst eine Vielzahl zu betrachtender Faktoren. Die Eingangsparameter, die für eine Modellierung zu Grunde gelegt werden müssen, sind teilweise mit Ungewissheiten belastet. Dies sollte bei der Einschätzung der Verlässlichkeit einer solchen Dosisberechnung bedacht werden. Daher ist ein Vergleich unterschiedlicher Standorte, v.a. auch unterschiedlicher Wirtsgesteine mit Hilfe von Biosphärenmodellen nur eingeschränkt durchführbar. Daher ist die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen hinsichtlich der Dosisgrenzwerte zu überprüfen, es sollten jedoch unterhalb dieser Grenzwerte keine weiteren Schlüsse zu Vor- oder Nachteilen von Standorten gezogen werden. Vielmehr sollten Standorte, für die die Grenzwerte eingehalten werden, als diesbezüglich sicherheitstechnisch gleichwertig angesehen werden.

Wie bereits erwähnt, gewährleisten alle Teilaspekte des Standortes den sicheren Einschluss des eingelagerten Inventars im Nachweiszeitraum. Eine Entscheidung zwischen mehreren Standorten kann gegebenenfalls über den wiederholten Vergleich einzelner Aspekte durchgeführt werden. Bietet beispielsweise ein Standort eine geeignetere Temperatur im Einlagerungsniveau, sodass eine Auffahrung kleinräumiger möglich wäre und die Überschreitung von Grenztemperaturen weniger wahrscheinlich ist, könnte dieser Standort im Vergleich bevorzugt werden. Allerdings ist auch hier der Vergleich zwischen Standorten in verschiedenen Wirtsgesteinen wegen der unterschiedlichen Anforderungen an das Endlagerbergwerk schwierig und gegebenenfalls nur für Teilaspekte (Bsp. Aufbau des Deckgebirges) möglich. In jedem Fall sollten in einen Vergleich die Ungewissheiten hinsichtlich der Erfüllung der Sicherheitsfunktionen und die diesbezügliche Robustheit und Sicherheitsreserven eingehen. Weitere mögliche Hilfsmittel zu einem Standortvergleich sind Abschätzungen zu Schadstoffströmen zum Beispiel am Rand des ewG und weitere Indikatoren (NEA 2012a).

Ein wichtiger und nach jedem Verfahrensschritt wiederkehrender Aspekt ist die wirksame Einbindung der Bevölkerung in den gesamten Auswahlprozess. Laut StandAG (2013) soll der

Standort mit der bestmöglichen Sicherheit das Ergebnis des Verfahrens sein. Sollten am Ende des Verfahrens zwei Standorte verbleiben, welche beide eine ausreichende Sicherheit gewährleisten können, könnte theoretisch die endgültige Standortentscheidung ebenfalls durch Bürgerentscheid oder durch eine freiwillige Zusage seitens der ansässigen Bevölkerung getroffen werden.

7 Ausblick

Trotz des Abschlussberichts der Kommission besteht noch Klärungsbedarf für verschiedene Aspekte des Auswahlverfahrens. So ist beispielsweise nicht genau definiert, welche Schritte oder Ergebnisse erbracht werden müssen, damit ein Erkundungsschritt als abgeschlossen gelten kann. Dies betrifft sowohl die übertägige als auch die untertägige Erkundung. Oft handelt es sich hierbei um einen Abwägungsprozess, da eine genauere Erkundung oftmals mit einer Schädigung des Wirtsgesteins oder der geologischen und technischen Barrieren in Zusammenhang steht. Genau deshalb muss definiert werden, welcher Informationsgewinn erreicht werden soll und welche Maßnahmen dafür ergriffen werden müssen (z.B. 3D-Seismik im zweiten Verfahrensschritt, Definition des zu erkundenden Bereichs in der untertägigen Erkundung). Darüber hinaus muss konkretisiert werden, welche Informationen durch Sicherheitsuntersuchungen gewonnen werden sollen, um so Erkundungsmaßnahmen zielgerichtet planen zu können. Eine Sicherheitsuntersuchung ist nach jedem Erkundungsschritt zu erbringen. Hierzu muss die Definition der sicherheitsrelevanten Sachverhalte und der Bestandteile der jeweiligen Sicherheitsuntersuchung rechtzeitig erfolgen. Sicherheitsuntersuchungen ermöglichen eine Einordnung der Abwägungskriterien hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung. Die Rolle der Sicherheitsuntersuchung im Hinblick auf die Abwägung bei der Standortauswahl ist zu präzisieren. Darüber hinaus sind Forschungen zur Methodik des Standortvergleichs – auch und gerade für unterschiedliche Wirtsgesteine – erforderlich. Ausgangspunkt kann dabei beispielsweise das FuE-Vorhaben VerSi sein, bei dem unter anderem Modellkonzepte und Anforderungen für Ton- und Salzstandorte wie auch Abwägungsmethoden zwischen Standorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen entwickelt wurden (siehe dazu BFS 2016c).

Ein Schwerpunkt zukünftiger FuE-Arbeiten sollte in der Entwicklung nicht-invasiver Erkundungsmethoden liegen, welche bestenfalls im ersten Verfahrensschritt angewendet werden können. Ein Beispiel hierfür wurde in dieser Arbeit bezüglich der Abschätzung der Temperatur im Tiefenniveau des Endlagers erbracht.

Die VSG kann unter anderem im Bereich der Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie möglicher Einlagerungstechniken (Einlagerungskonzept- und Mechanismen, Behälterplanung, Verfüllung, etc.) als Grundlage und Orientierungsmöglichkeit für Sicherheits-, Nachweis- und Endlagerkonzepte für Endlager im Salz in steiler Lagerung verstanden werden. Allerdings unterliegen vor allem diese technischen Aspekte einer konstanten Forschung und Entwicklung und müssen an diese stetig angepasst werden (siehe auch ESK 2016b). Darüber hinaus ist im Bereich der Detektionsmethoden (vor allem im Wirtsgestein Salz) zur Lokalisierung von Inhomogenitäten und Fluiden Forschungsarbeit zu leisten. Im Bereich der geowissenschaftlichen

und klimatischen Langzeitprognose gibt es Sachverhalte, die nach heutigem Wissensstand noch nicht genau verstanden werden; auch hier herrscht FuE-Bedarf. Allerdings muss als Folge mit diesen Unsicherheiten auch in Hinblick auf Sicherheitsreserven umgegangen werden.

Die Bevölkerung hat laut KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE (2016) nach jedem Prozessschritt die Möglichkeit ein Nachprüfrecht geltend zu machen, welches durch das BfE und das BGE bearbeitet werden muss. An jeder Phase des Auswahlprozesses sind darüber hinaus Gremien auf regionaler, überregionaler und nationaler Ebene beteiligt (KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016). Das Ziel ist, dadurch eine breite Zustimmung aus Seiten der Bevölkerung zu erreichen. Eine solche intensive Einbindung der Öffentlichkeit ist gleichzeitig mit einem hohen Zeitaufwand verbunden. Es wird jedoch im Kommissionsbericht von möglichst gering zu haltenden Lasten und Pflichten für zukünftige Generationen gesprochen. Die Generation, die den größten Nutzen aus der Kernenergie gezogen hat, hätte auch die Entsorgung der anfallenden Abfallstoffe regeln sollen. Die durch das StandAG postulierten Zeiten (Entscheidung Standort circa im Jahr 2031, Inbetriebnahme circa im Jahr 2050) werden durch die Kommission als nicht realistisch bezeichnet. Somit reicht die Entsorgungsproblematik nun doch in die nächste, wenn nicht auch in die übernächste Generation. THOMASKE & KUDLA (2016) haben versucht, eine realistische Einschätzung des Zeitbedarfs zu skizzieren; demnach soll die Standortauswahl ca. im Jahr 2077 beendet sein. Der Beginn der Einlagerung nach Planung, Genehmigungsverfahren und Auffahrung des Endlagerbergwerks wird nach THOMASKE & KUDLA (2016) ca. im Jahr 2117 stattfinden.

Der Grundstein zum Auffinden eines Standortes zur Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle wurde durch das StandAG, die Sicherheitsanforderungen des BMU und den Abschlussbericht der Kommission gelegt. Es kann u. a. auf die VSG und auf Erfahrungen aus anderen Ländern, welche zum Teil in ihren Standortauswahlverfahren sehr viel weiter fortgeschritten sind, zurückgegriffen werden. Sicher ist, dass einige Aspekte des Verfahrens und der Sicherheitsuntersuchungen, wie sie nun durch die Kommission postuliert wurden, weiter konkretisiert und ausgearbeitet werden müssen. Auch ist permanent weiter Forschung und Entwicklung zu betreiben, um den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik im Verlauf des Verfahrens gewährleisten zu können. Nur so kann schließlich derjenige Standort festgelegt werden, der den sicheren Einschluss der hochaktiven Abfälle bzw. die bestmögliche Sicherheit über den Nachweiszeitraum gewährleisten kann.

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Vergleich des Standortauswahlverfahrens im Standortauswahlgesetz und der Verfahrensschritte des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Gelb unterlegte Abschnitte stellen den jeweiligen Untersuchungs- bzw. Erkundungsschritt dar. Blau unterlegte Abschnitte beschreiben das Ziel des Erkundungsschrittes in Bezug auf die Standortauswahl und graue Abschnitte das Ziel des Erkundungsschrittes in Bezug auf die Entwicklung von Maßstäben oder Kriterien.	9
Tab. 2: Vergleich der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien. Grundlage des Vergleichs ist der Bericht des AkEnd	35
Tab. 3: Übersicht über sicherheitsrelevante Sachverhalte am Standort, deren Bedeutung und die daraus entstehenden Schlussfolgerungen bzw. Kriterien	90
Tab. 4: Übersicht über die im ersten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte und deren Bedeutung in der Sicherheitsuntersuchung	100
Tab. 5: Übersicht über die im ersten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte, die diesbezüglich bestehenden Ungewissheiten, Sicherheitsreserven, den Erkundungs- und FuE-Bedarf sowie mögliche Optimierungsmöglichkeiten	103
Tab. 6: Übersicht über die Datenlage der sicherheitsrelevanten Sachverhalte	108
Tab. 7: Vergleich der Salzstöcke Morsleben, Asse und Gorleben	111
Tab. 8: Übersicht der gesammelten Proben, deren gemessene Wärmeleitfähigkeit und Standardabweichung der jeweils sechs Einzelmessungen jeder stratigraphischen Einheit	126
Tab. 9: Kombinationsmöglichkeiten der FEP-Gruppen	133
Tab. 10: Übersicht über die im zweiten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte, daraus folgender Kriterien und Sicherheitsbewertungen	139
Tab. 11: Übersicht über die im zweiten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte, die diesbezüglich bestehenden Ungewissheiten, Sicherheitsreserven, den Erkundungs- und FuE-Bedarf sowie mögliche Optimierungsmöglichkeiten	142
Tab. 12: Übersicht über die im dritten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte, daraus folgender Kriterien und Sicherheitsbewertungen	162
Tab. 13: Übersicht über die im dritten Verfahrensschritt sicherheitsrelevanten Sachverhalte, die diesbezüglich bestehenden Ungewissheiten, Sicherheitsreserven, den Erkundungs- und FuE-Bedarf sowie mögliche Optimierungsmöglichkeiten	165
Tab. 14: Mineralogische Zusammensetzung der gesammelten Gesteinsproben	188

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Ablaufschema des Standortauswahlgesetzes, Stand 2014 (nach BFS 2013)	7
Abb. 2: Neue, im Abschlussbericht vorgeschlagene Organisationsstruktur (verändert nach KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE 2016)	8
Abb. 3: Vereinfachtes Schema des geologischen Mehrbarrierensystems (Variante mit Zugang über Schächte)	17
Abb. 4: Maximaler Gletschervorstoß während der letzten drei Eiszeiten (MRUGALLA 2011)	45
Abb. 5: Vereinfachte Darstellung der Grundwasserbewegung eines warmen (A) und eines kalten Gletschers mit Permafrostbereichen (B) aus BOETTICHER ET AL. (2011)	48
Abb. 6: Auswirkungen der Gletscherauflast auf einen Salzstock. Die Pfeile zeigen die relative Bewegung des Salzstocks an (SIROCKO ET AL. 2008)	49
Abb. 7: Verbreitung von Permafrost und Bereich mit möglichen hydromechanischen Rissen (verändert nach BOULTON & CABAN 1995)	50
Abb. 8: Quartärbasis, Eisrandstände und Verteilung der glazigenen Rinnen in Norddeutschland (MRUGALLA 2011, nach STACKEBRANDT ET AL. 2001)	52
Abb. 9: Bild 1 zeigt die Spannungsverteilung vor der Gletscherüberdeckung. Die horizontale Spannungskomponente dominiert. Bild 2 verdeutlicht, dass die vertikale Spannung bei Eisüberdeckung verstärkt wird. Bild 3 zeigt die Situation nach Gletscherrückzug. Die vertikale Spannungskomponente nimmt schneller ab als die horizontale Spannung, was die Bildung von horizontalen oder annähernd horizontalen Rissen begünstigt (verändert nach BOULTON ET AL. 2001)	56
Abb. 10: Rohstoffkarte Norddeutschlands (verändert nach HUY 2013)	60
Abb. 11: Temperaturkarte Deutschlands in 1000 m u. NN (LIAG 2008)	62
Abb. 12: Darstellung der dominierenden Grundwasserleiter in den überlagernden Schichten des Salzstocks Gorleben (KLINGE ET AL. 2007)	66
Abb. 13: Auswirkungen von Störungen auf die Grundwasserströmung (MRUGALLA 2011)	67
Abb. 14: Grundwassertemperaturen in der Region um den Salzstock Gorleben in 150 m Teufe (KLINGE ET AL. 2007)	68
Abb. 15: Verbreitung der advektiven Differenztemperaturen nordwestlich des Salzstocks Gorleben in 180 m Teufe (KLINGE ET AL. 2007).	69
Abb. 16: Hydrochemische Bedingungen in den überlagernden Schichten des Salzstocks Gorleben (NO-SW-Verlauf) (verändert nach KLINGE ET AL. 2007)	70
Abb. 17: Karte der Erdbebenepizentren in Deutschland und angrenzenden Gebieten von 800 – 2008. Die Intensitäten I ₀ der Epizentren sind in der Legende dargestellt (LEYDECKER 2011)	75

- Abb. 18: Lage der Erdbeben- und Vulkangebiete in Deutschland (verändert nach SIEBERT 2012). Die roten Sterne kennzeichnen Gebiete, welche innerhalb der letzten Million Jahre aktiv waren. 76
- Abb. 19: Vorherrschendes Spannungsregime in Norddeutschland. Die gestrichelten Linien zeigen die Hauptspannungsrichtungen: NW-SO-Richtung im westlichen Teil des Kartenausschnitts, N-S-Richtung im zentralen und NNO-SSW-Richtung im östlichen Bereich. Die Pfeile verdeutlichen die Kompressions- und Extensionsbewegung, die vorwiegend in Richtung NW-SO und NO-SW orientiert sind (REICHERTER ET AL. 2005) 78
- Abb. 20: Schematische Darstellung von Streckenlagerung (oben) und Bohrlochlagerung (unten) im Steinsalz (nach WÜSTE ET AL. 2010). 97
- Abb. 21: Messgerät „SolidTherm“ der Firma GeoTec (Clausthal-Zellerfeld) 124
- Abb. 22: Temperaturmessung am Beispiel des Buntsandsteins, Messzeit 120 s 125
- Abb. 23: Entwicklung der globalen Durchschnittstemperatur der letzten 450.000 Jahre vor heute (bearbeitet nach BUBENZER & RADTKE 2007) 129
- Abb. 24: Lage der Probeentnahmepunkte, Geologische Karte von Niedersachsen (aus SCHILD VON SPANNENBERG 2016) 187
- Abb. 25: Lage der Probeentnahmepunkte, Raum Blankenburg (aus SCHILD VON SPANNENBERG 2016) 187

Literaturverzeichnis

AGEMAR, T., ALTEN, J., GANZ, B., KUDER, J., KÜHNE, K., SCHUMACHER, S., SCHULZ, R. (2014): The Geothermal Information System for Germany – GeotIS. – In: ZDGG, **165**, Heft 2, 129-144

AGEMAR, T., SCHULZ, R., WEBER, J. (2014): Deep Geothermal Energy Production in Germany. – In: *Energies* 2014, **7**, Heft 7, 4397-4416

APPEL, D. BALTES, B., BRÄUER, V., BREWITZ, W., DUPHORN, K., GÖMMEL, R., HAURY, H.-J., IPSEN, D., JENTZSCH, G., KREUSCH, J., KÜHN, K., LUX, K.-H., SAILER, M., THOMASKE, B. (AKEND) (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. – Köln (W & S Druck GmbH)

ATG: BUNDESTAG (HRSG.) (2013): Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz – AtG). – Berlin

BAHLBURG, H. & BREITKREUZ, C. (2004): Grundlagen der Geologie, 2. Auflage. – München (Elsevier GmbH)

BAUER, G. (1991): Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren?. – In: *Zbl. Geol. Paläont.*, **1/4**, 1247-1261, Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)

BEISE, E., BIESOLD, H., GRÜNDLER, D., HANDGE, P., LANGE, F., LARUE, J., MIELKE, H., MÜLLER, W., PFEIFFER, F., PFEFFER, W., WURTINGER, W. (GRS) UND JARITZ, W., MEISTER, D., SCHNIER, H. (BGR) (1991): Sicherheitsanalyse des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktor-sicherheit (GRS) mbH)

BEUTH, T., BRACKE, G., BUHMANN, D., DRESBACH, C., KELLER, S., KRONE, J., LOMMERZHEIM, A., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., RÜBEL, A., WOLF, J. (2012): Szenarienentwicklung – Methodik und Anwendung, Bericht zum Arbeitspaket 8, VSG. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS Bericht 284)

BEUTH, T. (2013): Vorschlag zur Einordnung von Szenarien für tiefe geologische Endlager in Wahrscheinlichkeitsklassen. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS Bericht 296)

BOETTICHER, L., COTTRELL, M., DOOSE, H., GÜNTHER, R.-M., NAUMANN, D., POPP, T., SALZER, K., WOLFF, P. (2011): Glazigene Beeinflussung von Wirtsgesteinstypen Ton und Salz und deren Einflüsse auf die Eignung zur Aufnahme eines HAW-Endlagers – Abschlussbericht.– Celle (Bundesamt für Strahlenschutz)

BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., DÖRR, S., HEROLD, P., LERCH, C., BURGWINKEL, P., CHARLIER, F., THOMASKE, B., BRACKE, G., KILGER, R. (2012): Endlagerauslegung und – optimierung, Bericht zum Arbeitspaket 6, VSG. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS Bericht 281)

BOLLINGERFEHR, W., HERKLOTZ, M., HERZOG, C., JOBMANN, M., LOMMERZHEIM, A. WEIß, E., WOLF, J., ZIEGENHAGEN, J., HAMMER, J., SÖNNKE, J., MINGERZAHN, G. (2011): Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA), Synthesebericht. – Peine (DBE TECHNOLOGY GmbH)

BORNEMANN, O., BEHLAU, J., FISCHBECK, R., HAMMER, J., JARITZ, W., KELLER, S., MINGERZAHN, G., SCHRAMM, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben, Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

BOULTON, G. S. & CABAN P. (1995): Groundwater flow beneath ice sheets: Part II – Its impact on glacier tectonic structures and moraine formation. – In: Quaternary Science Reviews, **14**, 563-587, Great Britain (Elsevier Science Ltd.)

BOULTON, G. S., GUSTAFSON, G., SCHELKES, K., CASANOVA, J. & MOREN, L. (2001): Paleohydrogeology and geoforecasting for performance assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal (Pagepa). – In: Nuclear science and technology series, Report EU 19784, 147 pp., Luxemburg (Office for Official Publications of the European Communities)

BRACKE, G., FISCHER, H., FRIELING, G., HANSMEIER, C., HOTZEL, S., KOCK, I., SEHER, H., WEYAND, T. (2014): Entwicklungen und Untersuchungen zu (T)HMC-Prozessen eines Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle – Synthese und Abschlussbericht. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS Bericht 350)

BRACKE, G., POPP, T., PÜTTMANN, W., KIENZLER, B., LOMMERZHEIM, A., MOOG, H. C. (2012): Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben – Bericht der Arbeitsgruppe „Kohlenwasserstoffe“. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS Bericht 285)

BRASSER, T., HERBERT, H. J., MIEHE, R. (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, Anhang Standorterkundung – Das geologische Endlagersystem: Gebirgsverhalten und Erkundungsmethoden. – Braunschweig/Darmstadt (Öko-Institut e.V., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH)

BRÄUER, V., EICKEMEIER, R., EISENBURGER, D., GRISSEMAN, C., HESSER, J., HEUSERMANN, S., KAISER, D., NIPP, H.-K., NOWAK, T., PLISCHKE, I., SCHNIER, H., SCHULZE, O., SÖNNKE, J., WEBER, J. R. (2012): Standortbeschreibung Gorleben, Teil 4: Geotechnische Erkundung des Salzstocks Gorleben. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe & Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie)

BUBENZER, O. & RADTKE, U. (2007): Natürliche Klimaänderungen im Laufe der Erdgeschichte. – In: Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, 17-26, Potsdam (Humboldt-Universität zu Berlin, Hrsg.: Endlicher, W. & Gerstengarbe, F.-W.)

BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (Hrsg.): *Forschungshandlungen im Festlandsockel-Bereich* [online], Hamburg, 2014 (zitiert Aug. 2014):
<<http://www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wissenschaft/Forschungshandlungen/index.jsp>>

BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (Hrsg.): *Bergwerk Gorleben* [online], Salzgitter, 2016a (zitiert April 2016): <<http://www.bfs.de/DE/themen/ne/endlager/standortauswahl/gorleben/gorleben.html> >

BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (Hrsg.): *Dauer des Umbaus von Schacht Konrad zu einem Endlager* [online], Salzgitter, 2016b (zitiert April 2016): <<http://www.endlager-konrad.de/Konrad/DE/themen/umbau/umbaudauer/umbaudauer.html>>

BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (Hrsg.): *Endlagerung radioaktiver Abfälle – eine mobile Ausstellung*, 2013 (zitiert Jan. 2015): <<http://www.bfs.de/media/endlagerausstellung/start.html>>

BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (Hrsg.): *Endlager Morsleben* [online], Salzgitter, 2014a (zitiert Okt. 2014): <http://www.bfs.de/de/endlager/endlager_morsleben>

BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (Hrsg.): *Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich* [online], Salzgitter, 2005 (zitiert Juli 2016): <https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/berichte/ne/Synthesebericht-Endfassung.pdf;jsessionid=D92F743BDC443C7E39C48F3CD0AB3B79.1_cid382?__blob=publicationFile&v=1>

BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (Hrsg.): *Vergleichende Sicherheitsanalysen (VerSi)* [online], Salzgitter, 2016c (zitiert Okt. 2016): <<http://www.bfs.de/DE/themen/ne/endlager/standortauswahl/mehr-infos/versi.html>>

BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (Hrsg.): *Was ist die Asse?* [online], Salzgitter, 2014b (zitiert Nov. 2014): <http://www.asse.bund.de/DE/2_WasIst/_node.html;jsessionid=3FD93EDA7D881891DE966A4C3EC4DA2C.1_cid335>

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (Hrsg.) (2007): *Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland – Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen.* – Hannover/ Berlin

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR): *Stellungnahme der BGR zur Unterlage „Kleemann, Ulrich: Bewertung des Endlager-Standortes Gorleben; Geologische Probleme und offene Fragen im Zusammenhang mit einer Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)“* [online], Hannover, 2011 (zitiert Sept. 2014): <www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_GD/Dokumente__PDFs_/Berichte/BGR_Stellungnahme_Kleemann.pdf>

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (BMJV) & JURIS GMBH (Hrsg.): *Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)* [online], Berlin, 1990, letzte Änderung 2013 (zitiert Okt. 2014): <<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/uvpg/gesamt.pdf>>

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (BMJV) & JURIS GMBH (Hrsg.): *Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz – BNatSchG)* [online], Berlin, 2009, letzte Änderung 2013 (zitiert Okt. 2014):

<http://www.gesetze-im-internet.de/bnatschg_2009/BJNR254210009.html#BJNR254210009BJNG000100000>

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (BMJV) & JURIS GMBH (Hrsg.): *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG)* [online], Berlin, 2009, letzte Änderung 2013 (zitiert Okt. 2014): <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/whg_2009/gesamt.pdf>

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2010): *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle.* – Berlin

BUNDESRAT (HRSG.): *Gesetz zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung* [online], Köln, 2016 (zitiert Juli 2016): <http://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2016/0301-0400/347-16.pdf?__blob=publicationFile&v=1>

DAEF (2016): DAEF-Kurzstellungnahme zur Veröffentlichung „Deformation-assisted fluid percolation in rock salt“ (erschieden in Science am 30.11.2015). – Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung

DAEF (Stand 2015, in Vorbereitung): *Empfehlungen der DAEF zu Rolle und Methodik von Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren.* – Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung

DBE TECHNOLOGY GMBH (Hrsg.): *Gorleben* [online], Peine, 2011 (zitiert Nov. 2014): <<https://www.dbe.de/de/die-standorte/gorleben/index.php>>

DBE TECHNOLOGY GMBH (Hrsg.): *Gutachten – Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle* [online], Peine, 2016 (zitiert Aug. 2016): <https://www.bundestag.de/blob/418822/16d9b92575be1e111dcf8bf1641a50d7/kmat_58-data.pdf>

DELISLE, G. (1980): Berechnungen zur raumzeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes um ein Endlager für mittel- und hochradioaktive Abfälle in einer Salzformation. – In: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, **131**, 461-482, Hannover (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)

DIN EN ISO 22007-1:2012-04: *Kunststoffe – Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit, Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 22007-1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 22007-1:2012*

ENERCHANGE GBR (Hrsg.): *Mitteltiefe Geothermie – großes Potential im Norddeutschen Becken* [online], Freiburg, 2011 (zitiert Juli 2014): <<http://www.tiefengeothermie.de/top-themen/mitteltiefe-geothermie-grosses-potenzial-im-norddeutschen-becken>>

ENGELMANN, H.-J., LOMMERZHEIM, A., BIURRUN, E., HUBERT, R., PÖHLER, M. (1995): Direkte Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers. – Peine (DBE)

ENTSORGUNGSKOMMISSION (ESK), AUSSCHUSS ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (EL) (Hrsg.): *Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager – ein Diskussionspapier* [online] – Bonn, 2011 (zitiert Juli 2015): <<http://www.entsorgungskommission.de/downloads/epanlage2el19homepage.pdf>>

ENTSORGUNGSKOMMISSION (ESK) (HRSG.): *Diskussionspapier der Entsorgungskommission – Evaluation der Rand- und Rahmenbedingungen, Bewertungsgrundsätze sowie der Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)* [online] – Bonn, 2015 (zitiert Juli 2016): <<http://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/dpakendkriterien20151210hp.pdf>>

ENTSORGUNGSKOMMISSION (ESK) (HRSG.): *Empfehlung der Entsorgungskommission – Anforderungen an Endlagergebinde zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle* [online] – Bonn, 2016a (zitiert Juli 2016): <<http://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/epanlage1esk53hp.pdf>>

ENTSORGUNGSKOMMISSION (ESK) (HRSG.): *Stellungnahme der Entsorgungskommission – Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung* [online] – Bonn, 2016b (zitiert Okt. 2016): <<http://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/stnendlagerforschung12052016.pdf>>

FISCHER-APPELT, K., BALTES, B., BUHMANN, D., LARUE, J., MÖNIG, J. (2013): Synthesebericht für die VSG – Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-Bericht 290)

GERARDI, J. & WILDENBORG, A. F. B. (1999): Szenarienanalyse, Szenarienbewertung und geologische Langzeitprognose für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) – Langzeitprognose der Auswirkungen klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben. – Abschlussbericht, Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM (GFZ): *GEOFON Program* [online], Potsdam, 2014 (zitiert Sept. 2014): <<http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/list.php>>

GHANBARZADEH, S., HESSE, M. A., PRODANOVIC, M., GARDNER, J. E. (2015): Deformation-assisted fluid percolation in rock salt. – In: *Science*, **350** (Issue 6264), 1069-1072, Washington (American Association for the Advancement of Science)

GRISSEMAN, C. & CZORA, C. (2003): Projekt Gorleben – Das natürliche Temperaturfeld im Erkundungsbereich 1. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

HAMMER, J., FLEIG, S., MINGERZAHN, G., KÜHNLENZ, T., MERTINEIT, M., PUSCH, M., SCHRAMM, M., BEHLAU, J., ZARETZKI, B., HESSER, J., SHAO, H., KÖTHE, A., VOGEL, P. (2012): Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

HERRMANN, A. G. & KNIPPING, B. (1993): Fluide Komponenten als Teile des Stoffbestandes der Evaporite im Salzstock Gorleben. Vorkommen, Herkunft, Entstehung und Wechselwirkungen mit den Salzgesteinen. – Clausthal-Zellerfeld (TU Clausthal)

HOTH, P., SEIBT, A., KELLNER, T., HUENGES, E. (Eds.) (1997): Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrothermaler Ressourcen in Norddeutschland (Geothermie-Report 97-1). – Potsdam (GeoForschungsZentrum GFZ)

HUY, D., ANDRULEIT, H., BABIES, H.-G., HOMBERG-HEUMANN, D., MEßNER, J., NEUMANN, W., RÖHLING, S., SCHAUER, M., SCHMIDT, S., SCHMITZ, M., SIEVERS, H. (2013): Deutschland – Rohstoffsituation 2012. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

IAEA (2009): IAEA Safety Standards for protecting people and the environment – Classification of Radioactive Waste. – General Safety Guide, No. GSG-1. – Wien

IAEA (2012): IAEA Safety Standards for protecting people and the environment – The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. – Specific Safety Guide, No. SSG-23. – Wien

ICRP (2013): Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste, ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3)

JENSEN, P.K. (1983): Calculations on the thermal conditions around a salt diapir. – In Geophysical Prospecting, **31**, 481-489, Netherlands (EAGE)

KELLER, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheitsanalyse möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

KIRSCHSTEIN, G.: *Vulkane in der Eifel noch aktiv* [online], Hamburg, 2014 (zitiert Sept. 2014): <<http://www.nationalgeographic.de/aktuelles/vulkane-in-der-eifel-noch-aktiv>>

KLARR, K., KOLDITZ, H., KULL, H., SCHMIDT, M. W., SCHWEINSBERG, A., STEINBERG, S., STARKE, C., WALLMÜLLER, R. (1990): Erstellung von Tiefbohrungen auf der Südwestflanke der Asse – Abschlussbericht. – Neuherberg (GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH)

KLEEMANN, U.: *Bewertung des Endlager-Standortes Gorleben; Geologische Probleme und offene Fragen im Zusammenhang mit einer Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)* [online], Berlin, 2011 (zitiert Sept. 2014): <http://www.bi-luechow-dannenberg.de/dateien/2011/12/Bewertung_Endfassung_29Nov11.pdf>

KLIMABERG V: *Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen* (Klima-Bergverordnung – KlimaBergV) [online], Berlin, 1983 (zitiert Jan. 2015): <<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/klimabergv/gesamt.pdf>>

KLINGE, H., BOEHME, J., GRISSEMAN, C., HOUBEN, G., LUDWIG, R.-R., RÜBEL, A., SCHELKES, K., SCHILDKNECHT, F., SUCKOW, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben, Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

KOCKEL, F. & KRULL, P. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

KOCK, I., EICKEMEIER, R., FRIELING, G., HEUSERMANN, S., KNAUTH, M., MINKLEY, W., NAVARRO, M., NIPP, H.-K., VOGEL, P. (2012): Integritätsanalyse der geologischen Barriere – Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS Bericht 286)

KOMMISSION LAGERUNG HOCH RADIOAKTIVER ABFALLSTOFFE: *Abschlussbericht: Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes* [online], Berlin, 2016 (zitiert Aug. 2016): <http://www.bundestag.de/blob/434430/f450f2811a5e3164a7a31500871dd93d/drs_268-data.pdf>

KÖTHE, A., HOFFMANN, N., KRULL, P., ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben, Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

KUKLA, P., PECHNING, R., URAI, J. (2011): Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben – Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Aachen (international nuclear safety engineering GmbH, GRS Bericht 276)

LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE (LBEG): *Betriebe und Anlagen im Offshore-Bereich* [online], Hannover, 2014 (zitiert Aug. 2014): <http://www.lbeg.niedersachsen.de/startseite/bergbau/offshore/betriebe_und_anlagen/betriebe-und-anlagen-im-offshore-bereich-124109.html>

LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOPHYSIK (LIAG): *Temperaturkarten Deutschlands unterschiedlicher Tiefen* [online], Hannover, 2008 (zitiert Aug. 2014): <<http://www.liag-hannover.de/online-dienste-downloads/downloads/digitale-karten.html>>

LEYDECKER, G.: *Karte der Erdbebenepizentren in Deutschland für die Jahre 800 bis 2008* [online], Hannover, 2011 (zitiert Sept. 2014): <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefahrungsanalysen/Seismologie/Bilder/Sei_ger1map_g.html?nn=1544984>

Lux (2014): Persönliches Gespräch mit Prof. Dr. Karl-Heinz Lux (Institutsleiter des Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal)

MAJOROWICZ, J. & WYBRANIEC, S. (2010): New terrestrial heat flow map of Europe after regional paleoclimatic correction application. – In: International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau), **100**, 881-887, Berlin/ Heidelberg (Springer-Verlag)

MEIER, F. (2011): Ergebnisbericht – Machbarkeitsprüfung zur geoelektrischen Erkundung kleinräumiger laugenführenden Strukturen im Bergwerk Asse. – Torgau (Fugro Consult GmbH)

MINERALIENATLAS: *Kupferschiefer* [online], Kirchseeon, 2016 (zitiert Okt. 2016): <<https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/RockData?rock=Kupferschiefer>>

MINKLEY, W. & BRÜCKNER, D. (2016): Dichtheit von Salzgesteinen und Fluidperkolation. Studie IfG. – Leipzig, (IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH)

MINKLEY, W. & POPP, T. (2010): Sicherheitsabstände zur vorläufigen Dimensionierung eines untertägigen Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle im Salzgebirge. – Leipzig (IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH)

MÖNIG, J., BUHMANN, D., RÜBEL, A., WOLF, J., BALTES, B., PFEIFFER, F., FISCHER-APPELT, K. (2011): Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. – Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS Bericht 271)

MÖNIG, J., BUHMANN, D., RÜBEL, A., WOLF, J., BALTES, B., FISCHER-APPELT, K. (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept. – Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS Bericht 277)

MRUGALLA, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose – Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, GRS Bericht 275)

NEA (2012a): OECD Nuclear Energy Agency: Indicators in the Safety Case – A report of the Integrated Group on the Safety Case (IGSC). NEA/RWM/R(2012)7. – Paris

NEA (2012b): OECD Nuclear Energy Agency: Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste – Outcomes of the NEA MeSA Initiative, NEA-Report No. 6923. – Paris

NEA (2013a): OECD Nuclear Energy Agency: The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. NEA/RWM/R(2013)1. – Paris

NEA (2014): OECD Nuclear Energy Agency: The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art – Symposium Proceedings, 7-9 October 2013, Paris, NEA/RWM/R(2013)9

NEA (2013b): OECD Nuclear Energy Agency: Underground Research Laboratories (URL). NEA/RWM/R(2013)2. – Paris

NOLTE, N. (2010): Nutzungsansprüche und Raumordnung auf dem Meer. – In: Hansa International Maritime Journal (147. Jahrgang), **9**, 79-83, Hamburg (Schiffahrts-Verlag Hansa GmbH & Co. KG)

N-TV (Hrsg.): *Geologische Sensation in Bayern – Letzter Vulkanausbruch später als gedacht* [online], Köln/ Berlin, 2015, (zitiert Juli 2016): <<http://www.n-tv.de/wissen/Letzter-Vulkanausbruch-spaeter-als-gedacht-article15224676.html>>

OKRUSCH, M. & MATTHES S. (2005): Mineralogie – Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. – Berlin/ Heidelberg (Springer-Verlag)

ÖTES, A.: *Die neue Erdbebennorm DIN 4149* [online], Dortmund, 2005, (zitiert Aug. 2014): <http://www.bauwesen.tu-dortmund.de/tk/Medienpool/Bilder/Forschung/Die_neue_Erdbebennorm_DIN_4149_1.pdf>

REICHERTER, K., KAISER, A., STACKEBRANDT, W. (2005): The post-glacial landscape evolution of the North German Basin: morphology, neotectonics and crustal deformation. – In: International Journal of Earth Sciences, **94**, 1083-1093, Berlin/ Heidelberg (Springer-Verlag)

REINHOLD, K., KRULL, P., KOCKEL, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands, Geologische Karte 1 : 500.000. – Berlin/ Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

ROXBURGH, I. S. (1987): Geology of high-level nuclear waste disposal. An introduction. – Great Britain (Chapman and Hall)

SIEBERT, S.: *Infoblatt Erdbeben in Deutschland* [online], Leipzig, 2012, (zitiert Sept. 2014): <http://www2.klett.de/sixcms/list.php?page=geo_infothek&miniinfothek=&node=Erdbebenregionen&article=Infoblatt+Erdbeben+in+Deutschland>

SIROCKO, F., REICHERTER, K., LEHNÉ, R.W., HÜBSCHER, CH., WINSEMANN, J., STACKEBRANDT, W. (2008): Glaciation, salt and the present landscape. – In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (Eds.) Dynamics of Complex Intracontinental Basins – The Central European Basin System. – Berlin/ Heidelberg (Springer-Verlag)

SPIEGEL ONLINE: *Grubenunglück in Thüringen: Bergleute starben an hoher Kohlendioxid-Konzentration* [online], Hamburg, 2013, (zitiert Juli 2015): <<http://www.spiegel.de/panorama/grubenungluueck-staatsanwaltschaft-nennt-co2-als-ursache-a-925961.html>>

STACKEBRANDT, W., LUDWIG, A. O., OSTAFICZUK, S. (2001): Die Basis quartärer Ablagerungen der Ostseesenke und benachbarter Gebiete (Karte 2). – In: Neodynamica Baltica IGCP-Projekt 346, Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, **8**, No. 1, 13-16, Cottbus (LGB)

STANDAG: BUNDESTAG (HRSG.) (2013): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG). – Berlin

SCHILD VON SPANNENBERG, F. (2016): Petrographische Untersuchung an Gesteinen des postpermischen Untergrundes. – Masterarbeit, TU Clausthal

THOMASKE, B. & KUDLA, W.: *Zeitbedarf für das Standortauswahlverfahren und für die Errichtung eines Endlagers* [online], Berlin, 2016 (zitiert Nov. 2016): <http://www.bundestag.de/blob/433652/b8be0d236650bd1cf4477497cf5e4d8a/drs_267-data.pdf>

WEBER, J. R. (2015): Wirtsgestein Ton/Tonstein / Salz / Kristallin: Forschungsstand und Forschungsbedarf, unveröffentlichter Vortrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

WIECZOREK, K., FÖRSTER, B., ROTHFUCHS, T., ZHANG, C.-L., OLIVELLA, S., KARNLOT, P., GÜNTHER, R.-M., LERCH, C. (2010): THERESA Subproject MOLDAU – Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical Processes in Repository Safety Assessment, Final Report. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS Bericht 262)

WOLF, J., BEHLAU, J., BEUTH, T., BRACKE, G., BUBE, C., BUHMANN, D., DRESBACH, C., HAMMER, J., KELLER, S., KIENZLER, B., KLINGE, H., KRONE, J., LOMMERZHEIM, A., METZ, V., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., POPP, T., RÜBEL, A., WEBER, J. R. (2012): FEP-Katalog für die VSG – Dokumentation, Bericht zum Arbeitspaket 7. – Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS Bericht 283)

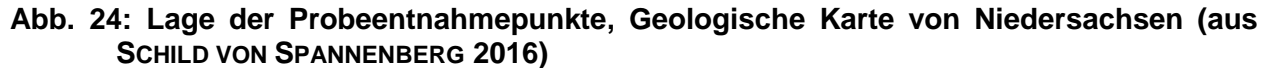
WÜSTE, U., POPP, T., NAUMANN, D., WIEDEMANN, M., BOBINSKY, J., TEJCHMAN, J. (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. – Leipzig (IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH)

ZANDER-SCHIEBENHÖFER, D., DONADEI, S., SCHNEIDER, G.-S. (2014): Mögliche Nutzungskonkurrenzen bei Energiespeichern im Untergrund. – In: Akademie für Geowissenschaften und Geotechnologien, Geoforum 2013, Raumordnung für den tiefen Untergrund Deutschlands, **30**, 37-42, Hannover (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)

ZOTH, G. & HAENEL, R. (1988): Appendix – Thermal conductivity. – In: Handbook of terrestrial heat-flow density determination with guidelines and recommendations of the international heat flow commission, 450, Dordrecht/ Boston/ London (Kluwer Academic Publishers)

Anhang

	Seite
A.1 Geographische Lage der Probeentnahmepunkte und mineralogische Zusammensetzung der gesammelten Gesteinsproben (nach SCHILD VON SPANNENBERG 2016)	188
A.2 Berechnung Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerte	191
A.3 Berechnung $T(z)$ am Beispiel der Bohrung Remlingen 5, Salzstock Asse	192
A.4 Berechnung $T(z)$ am Beispiel eines Salzkissens östlich von Berlin	193
A.5 Berechnung $T(z)$ am Beispiel eines Salzstocks bei Greifswald	194



Tab. 14: Mineralogische Zusammensetzung der gesammelten Gesteinsproben

	Quarz (%)	Calcit (%)	Dolomit (%)	Alkalifeldspat (%)	Plagioklas (%)	Tonminerale (%)	Sonstige (%)
Probe 14.1 - Bröckelschiefer	48,5	5		Mikroklin 27,7	Albit 14,9	Illit *1 4	
Probe 14.2 - Bröckelschiefer	51	4		Mikroklin 28	Albit 12	Illit *1 5	
Probe 23 - Rogenstein	12	88					
Probe 20.1 – Hardeggen-Sandstein	88,1			Mikroklin 7,9		Illit *1 4	
Probe 20.2 – Hardeggen-Sandstein	82			Mikroklin 13		Illit *1 5	
Probe 22 – Sandstein der Sollingfolge*2	Vh.*3			Mikroklin	Labradorit	Tosudit Chamosit	
Probe 15 – Röt-Ton	72,3		13,9			Illit *1 13,9	
Probe 4 - Wellenkalk		84	16				
Probe 12 – Wellenkalk		90	10				
Probe 8 – De-Dolomit	4	73	23				
Probe 29 – De-Dolomit	3	88	9				
Probe 1 – Dolomitischer Mergel	3	4	93				
Probe 18.1 – Dolomitischer Mergel	5	8	87				
Probe 18.2 – Dolomitischer Mergel	5	7	88				
Probe 6 - Trochitenkalk	4	93	3				
Probe 16 - Trochitenkalk	4	94	2				

Probe 9 – Heidelberg- sandstein	100						
Probe 13 – Heidelbergs- sandstein	100						
Probe 2 – Rhät- Sandstein	64			Mikroclin 28	Albit 6		Jarosit 2
Probe 10 – Rhät- Sandstein	81			Mikroclin 14	Albit 3		Jarosit 2
Probe 19 – Rhät- Sandstein	81,8			Mikroclin 14,2	Albit 3		Jarosit 1
Probe 17.1 – Posidonien- schiefer	3	97					
Probe 17.2 – Posidonien- schiefer	3	97					
Probe 28 – Korallen-oolith	4	94					Pyrit 2
Probe 7.1 – Gigas- Schichten	7	93					
Probe 7.2 – Gigas- Schichten	7	93					
Probe 11 – Serpulit	2	98					
Probe 26 – Serpulit		100					
Probe 27 – Wealden- Sandstein	100						
Probe 5 – Hilssand- stein	93					Kaolinit 7	
Probe 21 – Hilssand- stein	93					Kaolinit 7	
Probe 25 – Flammen- mergel	86	14					
Probe 24 – Turonpläner	7	93					
Probe 3.1 – Silikatischer Karbonat	25,7	42,6			Anorthit 23,8	Illit *1 3	Ankerit 5

Probe 3.2 – Silikatischer Karbonat	8,9	79,2		Anorthoklas 8,9			Ankerit 3
--	-----	------	--	--------------------	--	--	--------------

*1 Muskovit ist in Sedimentgesteinen nicht stabil und verwittert zum Mineral Illit. Da für Illit jedoch keine Karten gefunden wurden, die von der ICDD zugelassen sind, wurde Muskovit als Karte gewählt.

*2 Da den Karten der Minerale Tosudit und Chamosit keine RIR-Werte zugeordnet sind, ist hier eine Gehaltsangabe nicht möglich.

*3 vorhanden

A.2 Berechnung Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerte

	Turon-Pläner		HilsSst	Serpulit		Korallenoolith		Rhät-Sst		
		Flammenmerg.		Wealden-Sst		Gigas-Schich.		Posidoniensch.		Sst. (O. Mk.)
	2,87	2,78	3,26	4,56	2,48	2,49	3,01	3,01	3,33	3,20
	2,94	2,91	3,10	5,09	2,45	2,59	2,98	2,99	3,30	3,24
	2,95	3,18	3,18	5,18	2,28	2,55	2,92	2,79	3,33	3,14
	3,05	3,06	3,28	4,85	2,45	2,49	2,83	2,98	3,25	3,17
	3,06	2,99	3,19	4,94	2,50	2,50	2,82	2,79	3,26	3,20
	2,95	3,01		5,00	2,42	2,48	3,02	2,82	3,35	3,21
						2,54				
Mittelwert	2,97	2,99	3,20	4,94	2,43	2,52	2,93	2,90	3,30	3,19
Varianz	0,01	0,02	0,01	0,05	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
Stand.abw.	0,07	0,14	0,07	0,22	0,08	0,04	0,09	0,11	0,04	0,03
	Trochitenkalk			De-Dolomit		Röt-Ton		Hardeggen-Sst		Bröckelsch.
	Heidelberg-Sst		Dolom. Merg.		Wellenkalk		Bsst-Sollingf.		Oolith (Rogenst.)	
	3,26	2,95	3,78	3,10	2,99	2,20	3,15	4,86	2,88	3,24
	3,47	2,93	3,68	2,98	3,00	2,24	3,47	4,55	2,87	3,21
	3,44	2,95	3,67	3,03	3,05	2,13	3,32	4,36	2,85	3,15
	3,43	2,95	3,56	3,03	3,11	2,20	3,44	4,26	2,83	3,13
	3,39	2,94	3,59	2,96	3,05	2,22	3,32	4,56	2,86	3,19
	3,37	2,87	3,61	2,95	2,87	2,17	3,42	4,24	2,87	2,99
Mittelwert	3,39	2,93	3,65	3,01	3,01	2,19	3,35	4,47	2,86	3,15
Varianz	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,06	0,00	0,01
Stand.abw.	0,07	0,03	0,08	0,06	0,08	0,04	0,12	0,23	0,02	0,09

A.3 Berechnung T(z) am Beispiel der Bohrung Remlingen 5, Salzstock Asse

Q salinar (W/m ²)									
min	0,10								
max	0,14								
T (Oberfläche) in °C	9								
Stratigraphie	Lithologie (nach Referenzprof.)	K (W/mK)	K mitt (W/mK)	Bohrteufe (m)	Δz (m),	ΔT min (°C)	ΔT max (°C)	T(z) min (°C)	T(z) max (°C)
Keuper	Rhät-Sst.	3,30	3,30	523	511	15,5	21,7		
Muschelkalk	calcit. Sst.	3,18		624	101	3,2	4,5		
	Heidelberg-Sst.	3,39	3,17						
	Trochitenkalk	2,93							
	Dolom. Mergel	3,65	3,65	791	167	4,6	6,4		
	De-Dolomit	3,01	3,01	918	127	4,2	5,9		
	Wellenkalk	3,01							
Buntsandstein	Röt-Ton	2,19	2,19	1041	123	5,6	7,9		
in 1048 m Teufe						33,1	46,3	42,1	55,3
Hauptsalz Na ₂			5,22	1097	56	1,1	1,5		
in 1097 m Teufe								43,2	56,8
erwarteter Wert (1097 m)								45,0	53,0

A.4 Berechnung T(z) am Beispiel eines Salzkissens östlich von Berlin

Q salinar (W/m ²)						
min	0,10					
max	0,14					
T (Oberfläche) in °C	9					
Lithologie	K (W/mK)	Δz (m)	ΔT min (°C)	ΔT max (°C)	T(z) min (°C)	T(z) max (°C)
Quartäre Sande und Mergel	2,00	80	4,0	5,6		
Sandstein	3,62	72	2,0	2,8		
Kalkstein	2,91	158	5,4	7,6		
Mergelstein	2,96	174	5,9	8,2		
Tonstein	2,91	145	5,0	7,0		
in 625 m Teufe			22,3	31,2	31,3	40,2
Steinsalz	5,22	175	3,4	4,7		
in 800 m Teufe					34,6	44,9
erwarteter Wert (800 m)						ca. 43,7

A.5 Berechnung T(z) am Beispiel eines Salzstocks bei Greifswald

Q salinar (W/m ²)								
min	0,10							
max	0,14							
T (Oberfläche) in °C	9							
Stratigraphie	Lithologie	K (W/mK)	Bohrteufe (m)	Δz (m)	ΔT min (°C)	ΔT max (°C)	T(z) min (°C)	T(z) max (°C)
Quartär	Sande und Mergel	2,00	154	154	7,7	10,8		
Tertiär (Eozän)	Ton- und Sandstein	3,27	281	127	3,9	5,4		
Kreide	Sandstein	3,62	369	88	2,4	3,4		
Jura	Tonstein	2,91	464	95	3,3	4,6		
in 464 m							26,3	33,2
Steinsalz		5,22	800	336	6,4	9,0		
in 800 m Teufe							32,7	42,2
erwarteter Wert (800 m)								37,0